



Energiebesparing op het spoor



CE Delft

Committed to the Environment

Energiebesparing op het spoor

Dit rapport is geschreven door:

Lisanne van Wijngaarden

Anco Hoen

Arno Schrotten

Lonneke Wielders

Delft, CE Delft, september 2017

Publicatienummer: 17.4L67.137

Railverkeer / Energiebesparing / Kooldioxide / Reductie / Maatregelen / Kosten / Baten

Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Anco Hoen (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al ruim 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
	1.1 Aanleiding	6
	1.2 Doel van de studie	6
	1.3 De maatregelen	7
	1.4 Leeswijzer	7
2	Berekeningswijze	8
	2.1 Algemeen	8
	2.2 Stap 1: CO ₂ -reductie en energiebesparing	9
	2.3 Stap 2: Baten	11
	2.4 Stap 3: Kosten	12
	2.5 Stap 4: Kosteneffectiviteit van de CO ₂ -reductie	12
	2.6 Aandeel CO ₂ in reductie	13
	2.7 Update 3 kV en andere energiebesparingsmaatregelen	13
3	Beschrijving van de spoormaatregelen	14
	3.1 Inleiding	14
	3.2 Maatregelen	14
4	Resultaten	28
	4.1 Inleiding	28
	4.2 CO ₂ -reductie en energiebesparing	28
	4.3 CO ₂ -kosteneffectiviteit	30
	4.4 Aandeel CO ₂ -reductie in nationale uitstoot	31
5	Energiebesparingsmaatregelen in een breder perspectief	32
	5.1 Inleiding	32
	5.2 Overzicht maatregelen	32
	5.3 Vergelijking energiebesparing en CO ₂ -reductie	33
	5.4 Vergelijking CO ₂ -kosteneffectiviteit	35
6	Toerekening CO ₂ -effecten	37
	6.1 Werking groene stroom	37
	6.2 Groene stroom en CO ₂ -monitoringsprotocollen	39
	6.3 Toerekeningsvraagstuk	39
	6.4 Conclusie	40



7	Conclusies	41
	7.1 Vergelijking effectiviteit en kosteneffectiviteit 3 kV met andere spoormaatregelen	41
	7.2 Actualisatie analyse 2016	41
	7.3 Bepalen bijdrage 3 kV aan CO ₂ -doelstellingen	42
	7.4 Bepalen CO ₂ -reductie aan spoor	42
	7.5 Suggesties voor verder onderzoek	42
	Literatuur	43
A	Lijst met geraadpleegde deskundigen	44
	A.1 NS	44
	A.2 ProRail	44
	A.3 Spoorgloren	44
B	Berekeningen volgens CO ₂ -factor NS	45
	B.1 Inleiding	45
	B.2 CO ₂ -reductie	45
	B.3 CO ₂ -kosteneffectiviteit	46
	B.4 Aandeel CO ₂ -reductie in nationale uitstoot	47
C	Resultaten voor 2050	48
	C.1 Energiebesparingspotentieel in 2050	48
	C.2 CO ₂ -besparingspotentieel in 2050	48
	C.3 CO ₂ -kosteneffectiviteit in 2050	49



Samenvatting

Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu heeft CE Delft opdracht gegeven om de effecten van het verhogen van de netspanning op het spoor naar 3 kV te verkennen, en te vergelijken met andere energiebesparingsmaatregelen op het spoor. Recente studies suggereren dat 3 kV een veelbelovende maatregel is om energie en CO₂ te besparen. Zo heeft CE Delft in 2016 in opdracht van ProRail de duurzaamheidsbaten en kosten van 3 kV vergeleken met energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatregelen buiten de spoorsector. Deze nieuwe studie verbreedt die uit 2016 door 10 spoormaatregelen die onder de huidige netspanning van 1,5 kV kunnen worden geïmplementeerd, te vergelijken met de kosten en CO₂-reductie van een spanningsverhoging naar 3 kV. Specifiek wordt er gekeken naar energiebesparingspotentieel, CO₂-besparingspotentieel en CO₂-kosteneffectiviteit. De resultaten worden uitgedrukt in jaarlijks besparingspotentieel of kosteneffectiviteit, voor het zichtjaar 2030. Verder worden de resultaten uit de 2016 studie geactualiseerd aan de hand van de meest recente inzichten.

De maatregelen die behandeld worden in deze studie zijn:

1. Bijplaatsen van onderstations.
2. Koppelen van de bovenleiding.
3. Koppelen van de retourleiding.
4. Bouwen van terugvoedende onderstations.
5. Energieopslag langs het spoor.
6. Energieverliezen in componenten versneld reduceren.
7. Rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein.
8. Sterk inzetten op zuinig rijden.
9. Extra tractiemotoren in de Sprinter Lighttrain (SLT) hangen.
10. Vergroeningsmaatregelen voor regionaal ongeëlektrificeerd spoor.
11. Verhogen van netspanning naar 3 kV.

Methode

Gezien het feit dat de maatregelen precies afgestemd moeten worden op de Nederlandse spoorsector zijn veel gegevens opgehaald uit gesprekken met experts bij de NS en ProRail. De benodigde input voor het bepalen van de kosten en CO₂-reductie van 3 kV is uit de meest recente MKBA gehaald (versie 11 augustus 2017) (NS & ProRail, 2017). Gezien de grote spreiding in de expertschattingen wordt een onzekerheidsbandbreedte gehanteerd. De lage schatting is berekend op basis van een lage inschatting voor de kosten en een hoge inschatting voor de energiebesparingseffecten. In de hoge schatting is dit precies andersom.

Om de CO₂-uitstoot te kunnen berekenen is een projectie gemaakt van de gemiddelde CO₂-intensiteit van elektriciteitsopwekking in de toekomst, op basis van vastgesteld beleid. Aan de hand hiervan kan de energiebesparing in de toekomst omgerekend worden naar CO₂-besparing.

Doordat de NS haar treinen op hernieuwbare elektriciteit (uit wind) laat rijden, leidt energiebesparing niet direct tot CO₂-reductie. Indirect is er echter wel sprake van CO₂-reductie; immers, doordat er minder hernieuwbare energie nodig is voor het spoorvervoer kan er in andere sectoren meer hernieuwbare energie worden ingezet, waardoor er in die sectoren minder grijze stroom hoeft te worden ingezet. De CO₂-reductie die plaatsvindt omdat er minder elektriciteit wordt gebruikt komt Nederland als geheel ten goede. Deze CO₂-reductie kan strikt genomen niet aan de spoorsector zelf worden toegerekend. Wel kan de NS de energiebesparing claimen.



Energiebesparingspotentieel

Uit dit onderzoek blijkt dat 3 kV van alle onderzochte maatregelen het grootste energiebesparingspotentieel heeft. In 2030 is dit gemiddeld 327 GWh per jaar, vergelijkbaar met een kwart van het huidige jaarlijkse verbruik van de NS. Het koppelen van de bovenleiding, zuinig rijden en rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein hebben het potentieel om respectievelijk gemiddeld 87, 36 en 7 GWh per jaar te besparen. Het plaatsen van extra tractiemotoren en het vergroenen van het ongeëlektrificeerde spoor (via bio-LNG, waterstof of elektrificatie) leveren geen elektriciteitsbesparing op. De overige maatregelen hebben een veel lager besparingspotentieel, variërend van 0,05 tot 1,4 GWh per jaar.

CO₂-besparingspotentieel & bijdrage aan nationale CO₂-doelstellingen

De grootte van het CO₂-besparingspotentieel is in de meeste gevallen direct gerelateerd aan de elektriciteitsbesparing. 3 kV heeft met 95 kiloton per jaar het grootste CO₂-besparingspotentieel van alle onderzochte maatregelen. Het vergroenen van het regionale ongeëlektrificeerde spoor, waar momenteel met dieseltreinen op gereden wordt, bespaart weliswaar geen elektriciteit, maar reduceert wel CO₂. Deze maatregel kan in 2030 31 kiloton CO₂ reduceren. De overige maatregelen hebben een veel lager CO₂-besparingspotentieel.

Gezien het feit dat de spoorsector al een relatief zuinige sector is, is de bijdrage van de verschillende maatregelen aan de nationale CO₂-doelstellingen relatief klein. Het invoeren van 3 kV bespaart jaarlijks slechts 0,06% van de totale CO₂-uitstoot van Nederland.

CO₂-kosteneffectiviteit

Bij het berekenen van de CO₂-kosteneffectiviteit worden de jaarlijkse netto kosten van de maatregel gedeeld door de jaarlijkse CO₂-reductie. Indien er negatieve netto kosten zijn - baten die groter zijn dan kosten - is een negatieve kosteneffectiviteit mogelijk. Dit is een win-win situatie, waarbij het reduceren van CO₂ geld oplevert. Drie maatregelen hebben een negatieve kosteneffectiviteit; sterk inzetten op zuinig rijden, rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein en het koppelen van de bovenleiding. 3 kV heeft een positieve, maar lage kosteneffectiviteit, van € 97-121 per ton CO₂. Dit impliceert dat het reduceren van CO₂ via deze maatregel wel geld kost, maar relatief weinig in vergelijking met een aantal andere maatregelen. De overige spoormaatregelen hebben een kosteneffectiviteit van € 283 per ton CO₂ of meer en zijn daarmee duurder. Vergeleken met maatregelen buiten de spoorsector scoort het implementeren van 3 kV gemiddeld, en valt het tussen verhoogde bijmenging van biobrandstoffen en grootschalige implementatie van zonne-energie.

Er is een groot verschil tussen de berekende CO₂-kosteneffectiviteit in deze studie, gemiddeld € 109 per ton CO₂, en uit de vorige CE Delft-studie uit 2016, € -315 per ton CO₂. Dit verschil wordt verklaard door het verschil tussen de nieuwe MKBA waarop de berekeningen in dit rapport gebaseerd zijn, en de MKBA uit 2015. In de MKBA uit 2015 bleek 3 kV netto baten te hebben, terwijl de meest recente MKBA netto kosten laat zien.



1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In Nederland worden dagelijks 1,2 miljoen passagiers en 100.000 ton vracht vervoerd over het bijna 7.000 km lange spoor. Om de verwachte toekomstige groei aan te kunnen met een intensievere dienstverlening zijn er significante investeringen nodig. Uit een quickscan van ProRail in 2012 blijkt dat de overstap naar 3 kV netspanning een veelbelovende maatregel zou kunnen zijn.

Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) verkent momenteel, in samenwerking met ProRail en de NS, de effecten van het verhogen van de netspanning op het spoor naar 3 kV. Naast het feit dat deze maatregel leidt tot reistijdbaten voor de treinreiziger (o.a. doordat treinen sneller kunnen optrekken zodat reistijden korter worden en er meer treinen kunnen worden ingezet), draagt deze maatregel ook bij aan een duurzamer spoor. Enerzijds doordat de energieverliezen in de bovenleiding verlaagd kunnen worden en anderzijds doordat de efficiëntie van het hergebruik van teruggewonnen remenergie kan worden verhoogd.

Het verhogen van de netspanning op het spoor van 1,5 naar 3 kV brengt echter ook substantiële kosten met zich mee. Het is daarom van belang dat er een weloverwogen keuze wordt gemaakt. In 2016 heeft CE Delft in opdracht van ProRail de duurzaamheidsbaten en kosten van 3 kV vergeleken met energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatregelen buiten de spoorsector (CE Delft, 2016). Deze nieuwe studie verbreedt die uit 2016 door 10 spoormaatsregelen die onder de huidige netspanning van 1,5 kV kunnen worden geïmplementeerd, te vergelijken met 3 kV ten aanzien van energiebesparing en kosteneffectiviteit. Ook zijn de inzichten uit de 2016 studie geactualiseerd aan de hand van de meest recente inzichten.

1.2 Doel van de studie

Het primaire doel is om een aantal spoormaatsregelen die bij 1,5 kV kunnen worden geïmplementeerd te vergelijken met 3 kV ten aanzien van energiebesparing en kosteneffectiviteit. Daarnaast is het doel om de CO₂-reductie en kosteneffectiviteit van deze spoormaatsregelen inclusief 3 kV af te zetten tegen de energiebesparingsmaatregelen die in CE Delft (2016) zijn onderzocht. De volgende taken zijn hiertoe uitgevoerd:

- vergelijken van de (kosten)effectiviteit van 3 kV met tien alternatieve energiebesparingsmaatregelen in de spoorsector;
- actualisatie van de vergelijkende analyses zoals uitgevoerd in de CE Delft-studie uit 2016 ('Benchmark 3 kV tractievoeding') en daarin meenemen van tien alternatieve spoormaatsregelen;
- bepalen van de bijdrage van 3 kV en de tien alternatieve energiebesparingsmaatregelen op CO₂-doelstellingen (voor de Nederlandse economie als geheel);
- bepalen welk deel van de CO₂-reductie dankzij 3 kV en de tien alternatieve energiebesparingsmaatregelen toegerekend mag worden aan de spoorsector.



1.3 De maatregelen

Het Ministerie van I&M heeft in overleg met NS en ProRail een lijst van 10 maatregelen opgesteld die als alternatief kunnen dienen voor een overgang naar 3 kV netspanning. Het gaat om de volgende maatregelen:

1. Onderstations bijplaatsen.
2. Koppelen van de bovenleiding.
3. Koppelen van de retourleiding.
4. Terugvoedende onderstations.
5. Energieopslag langs het spoor.
6. Energieverliezen in componenten versneld reduceren.
7. Rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein
8. Sterk inzetten op zuinig rijden.
9. Extra tractiemotoren in de Sprinter Lighttrain (SLT) hangen.
10. Vergroeningsmaatregelen voor regionaal ongeëlektrificeerd spoor.

1.4 Leeswijzer

De rest van het rapport is als volgt gestructureerd:

- in Hoofdstuk 2 wordt de berekeningswijze van de CO₂-kosteneffectiviteit toegelicht.
- De maatregelen en hun effecten worden beschreven in Hoofdstuk 3.
- Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten van het onderzoek.
- Hoofdstuk 5 geeft een update van de studie uit 2016, en vergelijkt de spoormaatregelen met energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatregelen in andere economische sectoren.
- In Hoofdstuk 6 wordt dieper ingegaan op de vraag hoeveel CO₂-reductie er geclaimd mag worden door de spoorsector, naar aanleiding van deze energiebesparingsmaatregelen.
- Tot slot worden de belangrijkste conclusies getrokken in Hoofdstuk 7.



2 Berekeningswijze

2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk geven we een toelichting op de gebruikte methode om de effecten van de energiebesparingsmaatregelen te berekenen.

Om de kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie in €/ton CO₂ te kunnen berekenen moet in de eerste plaats bekend zijn wat de energiebesparing is die een maatregel oplevert. Daarnaast zijn gegevens nodig over de kosten van maatregel. Middels literatuuronderzoek is eerst getracht deze gegevens voor de maatregelen te achterhalen. Dit bleek lastig, omdat de te onderzoeken maatregelen niet beschreven zijn in de literatuur en daarnaast de benodigde informatie zo specifiek was dat gesprekken met deskundigen de enige manier bleek om deze boven tafel te krijgen. Voor een lijst met geraadpleegde experts zie Bijlage A. Via de geraadpleegde deskundigen zijn onderhands rapporten verworven met zeer nuttige informatie.

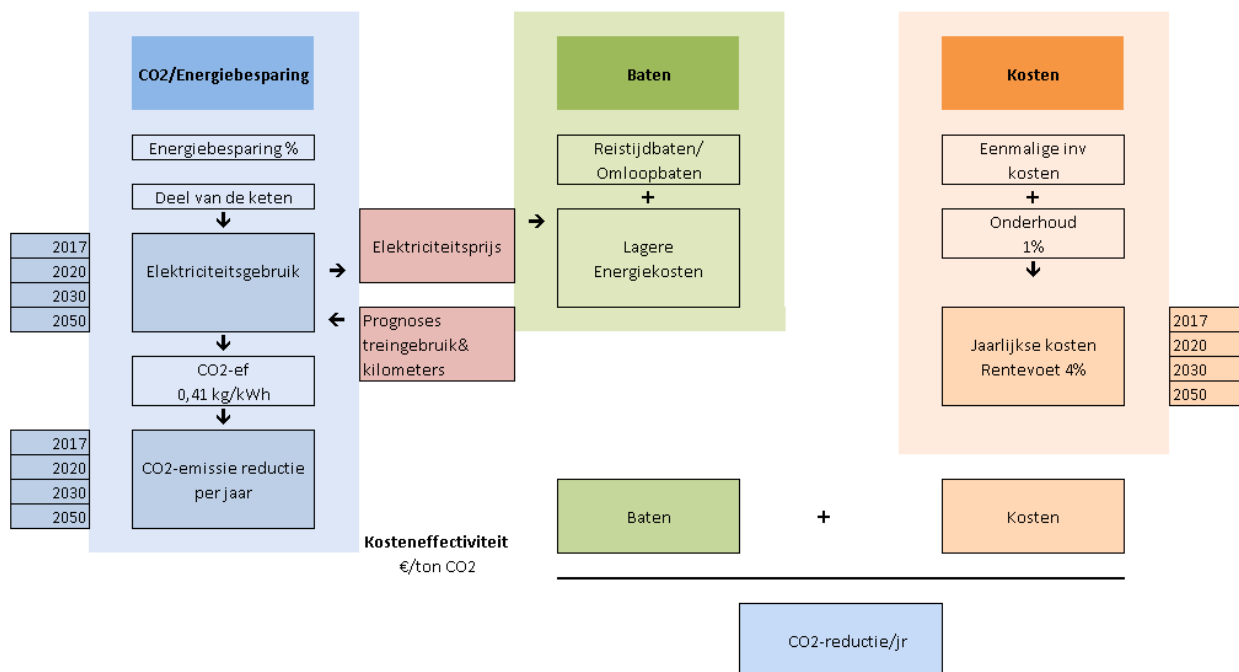
De berekeningen in deze studie zijn in belangrijke mate gebaseerd op expertschattingen van de geraadpleegde deskundigen. Het gaat om schattingen ten aanzien van de kosten, het energiebesparingspotentieel en in sommige gevallen de levensduur van materieel. De onzekerheden rond de berekeningen zijn daarmee groot. Om die reden is er voor gekozen bandbreedtes te hanteren in de berekeningen, die resulteren in twee schattingen. In de lage schatting wordt gerekend met lage kosten en grote energiebesparingseffecten. In de hoge schatting wordt gerekend met hoge kosten en kleine energiebesparingseffecten.

De reducties in CO₂ en energieverbruik worden afgezet tegen bestaand beleid. Hierbij is het van belang de kanttekening te maken dat we de CO₂-reductiedoelstelling zoals overeengekomen in het Parijsakkoord niet als vastgesteld beleid zien. Onze uitgangspunten zijn gebaseerd op de Nationale Energieverkenning (NEV) en het vastgesteld beleid.

De reducties in CO₂ en energieverbruik zijn berekend voor vier verschillende zichtjaren: 2017, 2020, 2030 en 2050. Hierbij moet wel de kanttekening gemaakt worden dat bij een aantal van deze maatregelen de implementatie meerdere jaren zal duren. Daarom zijn de waardes voor 2017 en 2020 alleen van belang om de hoeveelheid energiebesparing en CO₂-reductie uit op te nemen, en niet per definitie realistisch voor de logistieke implementatie van de maatregelen. De berekeningen voor het jaar 2050 zijn gebaseerd op voorgenomen beleidsdoelstellingen, zoals vrijwel emissievrije elektriciteitsopwekking in 2050. In het hoofdrapport worden de resultaten gepresenteerd voor het zichtjaar 2030. In Bijlage C worden de resultaten gepresenteerd voor het zichtjaar 2050.

In de rest van dit hoofdstuk gaan we in meer detail in op de stappen die worden doorlopen bij de berekeningen. In Figuur 1 zijn deze stappen schematisch weergegeven.

Figuur 1 - Schematische weergave van de doorlopen stappen voor de berekeningen



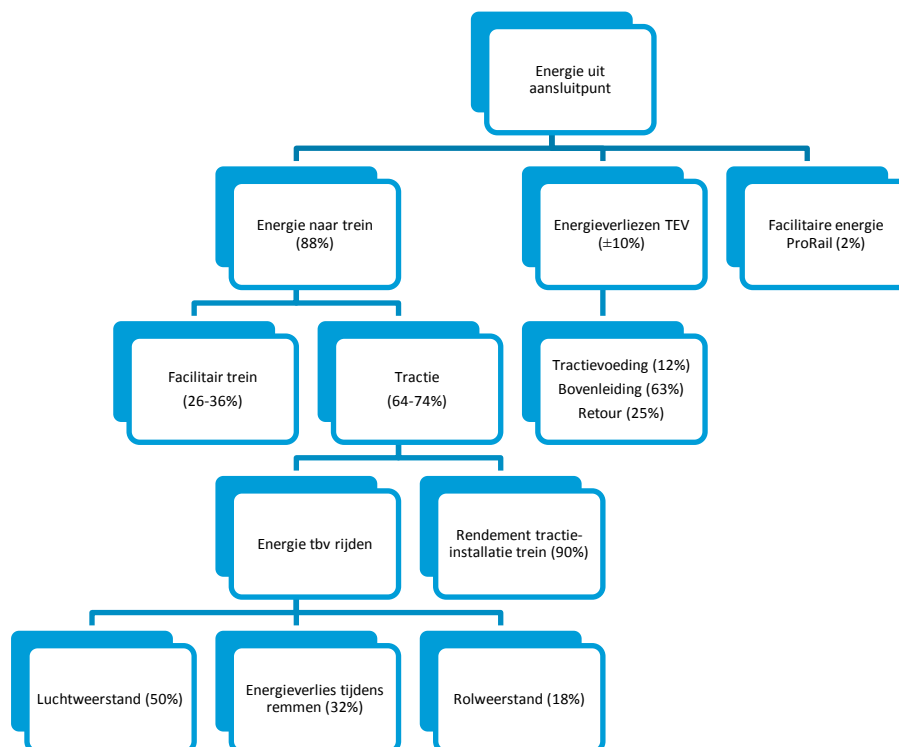
2.2 Stap 1: CO₂-reductie en energiebesparing

De eerste stap in de berekeningen bevindt zich in het blauwe gedeelte van Figuur 1. Op basis van de geschatte energiebesparing van de maatregel (in de meeste gevallen opgehaald tijdens de gesprekken met deskundigen) kan de energiebesparing en CO₂-reductie berekend worden.

De procentuele energiebesparing van de maatregel wordt toebedeeld middels percentages van het totale energieverbruik van de NS aan de hand van Figuur 2, gebaseerd op ten Harve (2012). In zijn studie zijn de energieverbuiken en –verliezen in een flowchart weergegeven met specifieke kentallen van een VIRM¹. Om het schema bruikbaar te maken voor alle typen treinen waar de maatregelen betrekking op hebben is het schema van ten Harve (2012) door ons voorzien van breedtes. De breedtes zijn in overleg met de NS vastgesteld.

¹ Een VIRM is een type trein in het materieelpark van de NS. De afkorting staat voor Verlengd InterRegio Materieel.

Figuur 2 - Schema energieverbruik



Bron: (Ten Harve, 2012).

Om de toekomstige CO₂-reductie en energiebesparing van de maatregelen te kunnen berekenen, is een projectie nodig van het energiegebruik van de NS tot en met het jaar 2050. Het elektriciteitsverbruik hangt samen met de mobiliteitsgroei en het treingebruik. In het NS Jaarverslag 2016 (NS, 2017), is aangegeven dat gestreefd wordt naar een reizigersgroei van 1,5% per jaar bovenop de totale groei van de mobiliteit. De totale reizigersgroei is vervolgens ontleend aan het Cahier Mobiliteit van de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (PBL, 2015). Daarnaast is de groei van elektriciteitsgebruik gecorrigeerd voor de energiebesparingsdoelstelling van de NS. Deze bedraagt 1% per jaar (vernomen uit gesprekken met experts).

Vervolgens dient de energiebesparing (per zichtjaar) te worden omgerekend naar CO₂-reductie. Hiervoor zijn aannames nodig over de opwekking van de elektriciteit en de bijbehorende CO₂-uitstoot. Aangezien de NS sinds 2017 alle energie duurzaam inkoop is het niet vanzelfsprekend dat energiebesparing ook daadwerkelijk leidt tot minder CO₂-emissie. Er zijn twee manieren waarop de CO₂-reductie kan worden afgeleid van de energiebesparing.

De eerste methode wordt toegepast in de nieuwe MKBA (NS & ProRail, 2017). In deze methode wordt ervan uitgegaan dat de energiebesparing het mogelijk maakt dat één centrale minder hard gaat draaien. Indien deze centrale kolengestookt is zal dat tot een grotere CO₂-reductie leiden dan wanneer er een gascentrale of volledig duurzame centrale kan worden uitgeschakeld. Deze centrale die minder hard gaat draaien wordt ook wel de 'marginale centrale' genoemd. Indien de marginale centrale volledig duurzaam is (en er dus geen CO₂ vrijkomt bij de elektriciteitsproductie in die centrale) dan treedt er geen CO₂-reductie op als die centrale minder elektriciteit produceert.

Voor de periode tot 2030 wordt er in (NS & ProRail, 2017) van uitgegaan dat de marginale centrale CO₂-uitstoot veroorzaakt (op basis van de gemiddelde energiemix) en dat de reductie van het energiegebruik voor 100% leidt tot een afname in grijze energieproductie (NS & ProRail, 2017). Voor 2050

wordt in de nieuwe MKBA aangenomen dat dit geen plausibele aanname meer is omdat de elektriciteitsproductie onder invloed van klimaatbeleid steeds schoner zal worden. In 2050 wordt daarom gerekend met energiebesparing die dan leidt tot een reductie in grijze energieproductie van 10% (NS & ProRail, 2017). Hierbij wordt een emissiefactor gehanteerd van 0,41 kg CO₂ per opgewekte kWh in 2030 en een emissiefactor 0,041 kg CO₂ per opgewekte kWh in 2050. In de nieuwe MKBA wordt niet onderbouwd waarom is gekozen voor een factor 10 lagere CO₂ emissiefactor. In Hoofdstuk 6 wordt dieper ingegaan op hoe en hoeveel CO₂-reductie de NS zelf mag claimen.

Een tweede methode om de CO₂-besparing te berekenen is door te kijken naar de gemiddelde uitstoot van een opgewekte kWh elektriciteit nu en deze uitstoot te projecteren naar de toekomst. De emissiefactor van elektriciteit is vastgesteld op 0,526 kg CO₂/kWh voor 2015 (CE Delft, 2015). Onder invloed van klimaatbeleid zal die emissiefactor naar verwachting gaan dalen in de toekomst. Door te kijken naar het aandeel hernieuwbare elektriciteit op basis van het huidige vastgestelde beleid in de NEV kan een prognose van de gemiddelde uitstoot van een kWh in de toekomst (tot en met 2035) worden berekend. Voor het zichtjaar 2050 gaan we uit van een aandeel van 95% hernieuwbare elektriciteit.

Tabel 1 vergelijkt beide methodes en vertaalt de ‘marginale’ methode van de NS & ProRail naar de gemiddelde emissiefactor.

Tabel 1 - Prognose gemiddelde CO₂-emissiefactor elektriciteit

Zichtjaar	NS & ProRail 2017 (kg CO ₂ /kWh)	CE Delft-prognose (kg CO ₂ /kWh)
2015	-	0,530
2017	-	0,450
2020	-	0,370
2030	0,410	0,290
2050	0,041	0,030

In dit rapport is primair gerekend met de emissiekentallen van de CE Delft-prognose. In Bijlage B worden de resultaten van de berekeningen op basis van de door NS & ProRail (2017) gehanteerde methode gepresenteerd. We kunnen hier alvast opmerken dat de uitkomsten het beeld van de uitkomsten niet sterk verandert (zie ook Figuur 21 in Bijlage B).

2.3 Stap 2: Baten

Het groene gedeelte in Figuur 1 illustreert de berekeningsmethode voor de baten. De baten van de maatregelen bestaan uit:

- reistijdbaten;
- omloopbaten;
- baten in de vorm van lagere energiekosten.

Reistijdbaten betreffen de gekwantificeerde waarde van reistijdwinst. Sommige van de maatregelen die in dit rapport onderzocht worden hebben naast de energiebesparing als bijkomend voordeel dat treinen sneller op kunnen trekken. Hierdoor komen de reizigers gemiddeld iets eerder aan op hun bestemming. Deze tijdswinst kan omgerekend worden in een financiële waarde door de collectieve reistijdwinst in uren te vermenigvuldigen met de value of time. De value of time is de gemiddelde betalingsbereidheid van mensen voor een uur reistijdwinst. In dit onderzoek is de value of time gelijk aan die in de nieuwe MKBA, en daarmee tevens consistent met de gegevens van de SEE-website van Rijkswaterstaat.

Omloopbaten zijn exploitatievoordelen door de snellere omloop van materieel en personeel. Door de reistijdwinsten kan het aantal in omloop zijnde treinen worden gereduceerd, doordat hetzelfde aantal treinkilometers met minder materieel gereden kan worden. Hierdoor kan er worden bespaard op zowel de treinstellen zelf alsook op de personeelskosten (NS & ProRail, 2017). De besparing in de personeelskosten vindt plaats doordat de duur van hun diensten gelijkmatig afneemt met de geïncasseerde reistijdwinst. In vergelijking met de besparing op de treinstellen zelf zijn deze baten echter gering. Omloopbaten zijn alleen van toepassing op de maatregel '3 kV'. De omloopbaten die wij gebruikt hebben komen rechtstreeks uit de MKBA (NS & ProRail, 2017).

De baten uit lagere energiekosten volgen uit het feit dat er minder elektriciteit ingekocht hoeft te worden. Door de hoeveelheid energiebesparing, die in Stap 1 berekend is (zie Paragraaf 2.2), te vermenigvuldigen met de energiekosten, worden de baten uitgedrukt in een financiële waarde. De gehanteerde elektriciteitsprijs is gebaseerd op het gemiddelde van het hoge en lage WLO-scenario (PBL, 2015) en gecorrigeerd voor inflatie conform CBS Statline voor de jaren 2014-2016. De elektriciteitsprijs loopt tussen 2017 en 2050 op van 53 €/MWh naar 97 €/MWh, dat is dus bijna een verdubbeling. De kosten voor de distributie door de bovenleiding zijn al jaren constant (€ 31,92 per MWh). Op basis van de gesprekken met experts is aangenomen dat deze trend zich doorzet. Deze aanname is wel met onzekerheid omgeven. Het is denkbaar dat door de energietransitie de kosten voor netbeheer stijgen. Hierover zijn echter geen schattingen bekend.

2.4 Stap 3: Kosten

De geschatte investeringskosten per maatregel komen uit de interviews met experts. Ook hier wordt een bandbreedte aangehouden met een lage en een hoge schatting. Door daarnaast ook aannames te maken over de verwachte levensduur van de verschillende maatregelen, kunnen we de eenmalige investeringskosten verspreiden over meerdere jaren. De levensduur verschilt per maatregel. Zo hebben gemiddelde maatregelen die betrekking hebben op de infrastructuur een verwachte levensduur van 40-50 jaar, terwijl treinmaatregelen een gemiddelde levensduur van 20-30 jaar hebben. Met een rentevoet van 4% zijn de investeringskosten per maatregel omgezet naar jaarlijkse kosten.

Daarnaast zijn ook jaarlijkse onderhoudskosten voor de verschillende maatregelen meegenomen. Als vuistregel voor het berekenen van de jaarlijkse onderhoudskosten van fysieke infrastructuur is 1% van de investeringskosten aangenomen. Voor materieel is tussen de 1 en 10% aangehouden. Dit is gebaseerd op gesprekken met deskundigen.

Bij een aantal maatregelen worden de onderhoudskosten op een andere manier berekend, onder andere bij "Energieopslag langs het spoor" en "Zuinig rijden". Voor "Energieopslag langs het spoor" is dit vanwege de hogere onderhoudskosten van batterijen. De onderhoudskosten van "Zuinig rijden" zijn berekend aan de hand van de tijd die machinisten kwijt zijn met hun jaarlijkse training en hun uurloon.

2.5 Stap 4: Kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie

Door de resultaten uit Paragraaf 2.2, 2.3 en 2.4 te combineren kan de kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie berekend worden, uitgedrukt in €/ton CO₂. De eerste stap is om per maatregel de jaarlijkse baten van de jaarlijkse kosten af te trekken. Vervolgens is de tweede stap om dat getal te delen door de CO₂-reductie die de maatregel oplevert.



De kosteneffectiviteit kan een positief of negatief getal zijn. Een negatieve kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie houdt in dat het reduceren van CO₂ per saldo geld oplevert. Een voorbeeld, met -100 €/ton CO₂ wordt bedoeld dat het reduceren van 1 ton CO₂ € -100 kost (ofwel € 100 oplevert).

Een positieve kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie houdt in dat het reduceren van CO₂ geld kost. Als voorbeeld, 100 €/ton CO₂ houdt in dat het reduceren van 1 ton CO₂ € 100 kost.

Maatregelen met een negatieve kosteneffectiviteit leveren dubbel voordeel op, CO₂-reductie en financieel voordeel. Het implementeren van maatregelen met een positieve CO₂-kosteneffectiviteit kost juist geld.

2.6 Aandeel CO₂ in reductie

Om de potentie van de verschillende maatregelen in een breder beeld te plaatsen, wordt de CO₂-reductie per maatregel afgezet tegen de CO₂-uitstoot van de Nederlandse economie als geheel. Die cijfers komen uit de Nationale Energieverkenning 2016 (ECN, 2016), oftewel de NEV, en de WLO (PBL, 2015).

2.7 Update 3 kV en andere energiebesparingsmaatregelen

Onderdeel van deze studie is een update van de studie van CE Delft in 2016, waarbij de kosteneffectiviteit van 3 kV werd vergeleken met een reeks energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatregelen in andere economische sectoren (CE Delft, 2016).

De berekeningsmethode voor deze maatregelen is vrijwel identiek aan Figuur 1. De kentallen die destijds gehanteerd zijn, zijn in deze studie nogmaals tegen het licht gehouden, om na te gaan of recentere, publieke data beschikbaar is waarmee we deze studie kunnen actualiseren. Het resultaat van deze check bleek echter negatief. Daarom is de vorige studie alleen geüpdatet door de energieprijzen te actualiseren en de inflatie mee te nemen in de berekeningen.



3 Beschrijving van de spoormaatregelen

3.1 Inleiding

Het Ministerie van I&M heeft in overleg met NS en ProRail een lijst van 10 maatregelen opgesteld die als alternatief kunnen dienen voor een overgang naar 3 kV netspanning. Het gaat om de volgende maatregelen:

1. Onderstations bijplaatsen.
2. Koppelen of parallel schakelen bovenleiding.
3. Koppelen of parallel schakelen retourleiding.
4. Terugvoedende onderstations.
5. Energieopslag langs het spoor.
6. Energieverliezen in componenten versneld reduceren.
7. Rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein.
8. Sterk inzetten op zuinig rijden.
9. Extra tractiemotoren in de SLT hangen.
10. Vergroeningsmaatregelen voor regionaal ongeëlektrificeerd spoor.

3.2 Maatregelen

In de volgende paragrafen worden deze maatregelen beschreven. Paragrafen 3.2.1 tot 3.2.10 behandelen de tien maatregelen die onder 1,5 kV ingevoerd kunnen worden. Deze maatregelen zijn grotendeels niet aan bod gekomen in de maatschappelijke kosten-batenanalyse uit 2015 (ProRail & NS, 2015). Paragraaf 3.2.11 wijdt uit over het verhogen van de netspanning naar 3 kV.

Voor alle maatregelen worden steeds twee schattingen onderscheiden. In het de lage schatting worden de laagste kosten en hoogste effectiviteit gebruikt. In de hoge schatting worden de hoogst geschatte kosten en de laagst geschatte effectiviteit gebruikt. De maatregelen kennen een verschillend niveau van onderzoek. De meeste effectschattingen zijn gebaseerd op mondeling verkregen kentallen van deskundigen. Andere effectschattingen waaronder ook die voor 3 kV zijn ontleend aan bestaande studies.

3.2.1 Onderstations bijplaatsen

Onderstations zijn elektrische installaties in het hoogspanningsnet, die verantwoordelijk zijn voor de tractievoeding van de trein (de energie die de trein nodig heeft om voort te bewegen). Onderstations transporteren de elektrische energie vanaf het aansluitpunt op het openbare netwerk naar de bovenleiding, en transformeren tegelijkertijd de aangeleverde spanning van 10 kV wisselspanning naar 1,5 kV gelijkspanning (Ten Harve, 2012). Momenteel zijn er circa 250 onderstations in Nederland.

Hoe groter de afstand tussen twee onderstations, hoe langer de afstand die de stroom door de bovenleiding moet afleggen om bij de trein te komen. Hoe groter deze afstand, hoe groter ook de weerstand die de stroom moet overwinnen en hoe groter de transport- of energieverliezen zijn. Door onderstations bij te plaatsen, worden de afstanden tussen onderstations en de trein verkleind, en verminderen de energieverliezen (Thielens & Ploeg, 2009).

De drukte van het treinverkeer bepaalt het aantal onderstations en de plaatsing ervan. Op drukkere trajecten zijn er doorgaans meer onderstations nodig dan op rustigere trajecten om alle treinen van



voldoende energie te voorzien. Daarmee is de afstand tussen de onderstations op drukkeren trajecten vaak kleiner dan op rustigere trajecten.

Vooral op rustigere trajecten treden transportverliezen op vanwege de lange afstanden tussen de onderstations en daarmee hoge weerstand die de stroom heeft. Uit onderzoek blijkt dat het bijplaatsen van onderstations op circa 10 locaties in Nederland kosteneffectief kan zijn (Thielens & Ploeg, 2009). In de lage schatting wordt gerekend met 5 onderstations, in de hoge schatting worden 10 onderstations bijgebouwd.

Deze maatregel (Onderstations bijplaatsen) staat los van de naar schatting 210 miljoen euro aan investeringen in onderstations die de komende tijd in het kader van het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer sowieso nodig zijn om de groei van het treinreizigersverkeer en de intensievere dienstverlening te kunnen accommoderen (Zoeteman, et al., 2014).

In Tabel 2 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In 'Hoog' is voor een kortere levensduur gekozen dan in 'Laag'. Een kortere levensduur betekent namelijk relatief hoge afschrijvingskosten. In Figuur 3 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 2 - Belangrijkste aannames: Onderstations bijplaatsen

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	0,583	0,437
Eenmalige investeringskosten (mln €)	25	50
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	0,25	0,50
Levensduur	50	40
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 3 - Locatie van energiebesparing in de keten: Onderstations bijplaatsen



3.2.2 Koppelen of parallel schakelen van de bovenleiding

Bij deze maatregel gaat het om het om het aanbrengen van koppelingen (verbindingen) tussen de bovenleidingen van verschillende sporen. Deze maatregel is dus alleen mogelijk bij meersporigheid. De koppelschakelaars worden gelijkmatig verdeeld over de voedende secties van het dubbelsporig baanvak. Door het koppelen wordt de bovenleidingweerstand verlaagd (de stroom hoeft immers over een kortere afstand getransporteerd te worden). Dit leidt tot minder energietransportverliezen en daarmee tot energiebesparing.

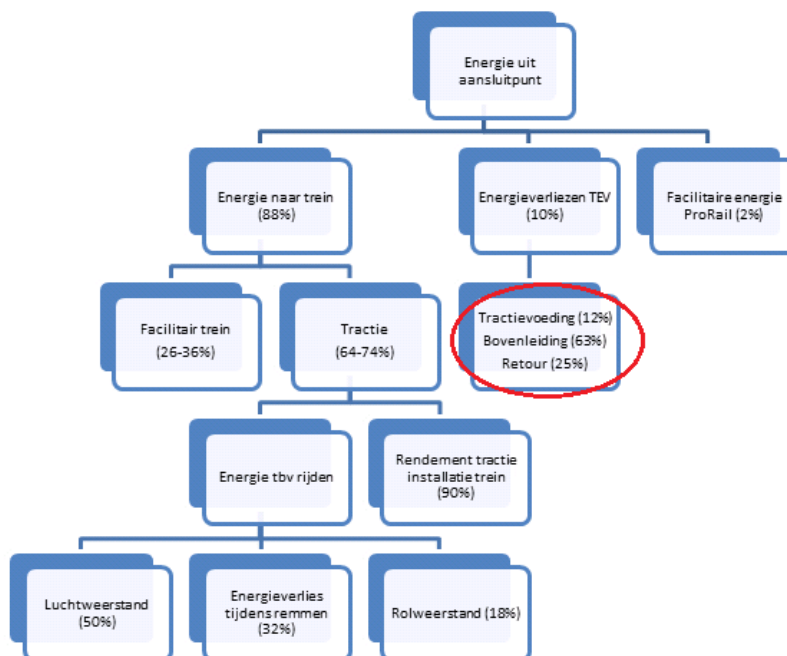
De koppelschakelaar is een bestaande techniek, die in Nederland al vele jaren wordt toegepast, maar nog niet voor het parallel schakelen van de bovenleiding (Jonker, 2010). Afhankelijk van het precieze ontwerp van de maatregel is het mogelijk dat de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van het tractie energievoorzieningsnet kan afnemen (Ten Harve, 2012). Door de onzekerheid van dit effect en de link met het precieze ontwerp van de maatregel hebben we deze factoren echter niet kunnen moneteriseren in het uitvoeren van de berekeningen.

In Tabel 3 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In Figuur 4 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 3 - Belangrijkste aannames: Koppelen bovenleiding

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	87,4	87,4
Eenmalige investeringskosten (mln €)	72	72
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	0,7	0,7
Levensduur	50	40
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 4 - Locatie van energiebesparing in de keten: Koppelen bovenleiding



3.2.3 Koppelen of parallel schakelen van de retourleiding

Bij deze maatregel gaat het om het koppelen van de retourleiding, ofwel de spoorstaven. Net als bij het koppelen van de bovenleiding is dit alleen mogelijk bij meersporigheid. De werking van deze maatregel is in beginsel hetzelfde als het koppelen van de bovenleiding: energietransportverliezen worden beperkt. Door de spoorstaven te koppelen wordt de stroom beter verdeeld over de leidingen en wordt de afstand tot de trein verkort. De transportweerstand, en daarmee ook het energieverlies, worden verlaagd.

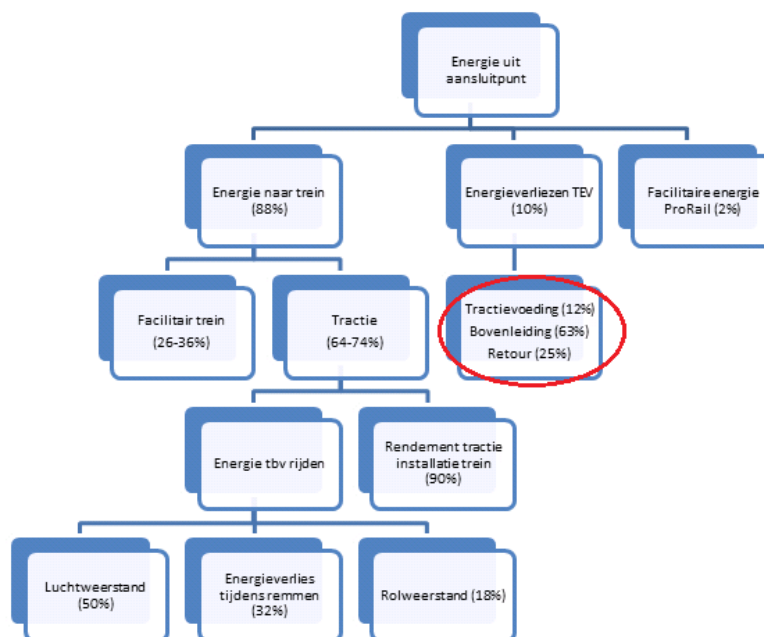
Net als bij het koppelen van de bovenleiding is het mogelijk dat de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van het tractie energievoorzieningsnet beïnvloed kan worden (Ten Harve, 2012). Daarnaast zijn er ook zorgen over de invloed van deze maatregel op de functionaliteit van de treinbeveiliging (Ten Harve, 2012).

In Tabel 4 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In Figuur 5 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 4 - Belangrijkste aannames: Koppelen retour

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	1,7	1,1
Eenmalige investeringskosten (mln €)	36	72
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	0,4	0,7
Levensduur	50	40
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 5 - Locatie van energiebesparing in de keten: Koppelen retour



3.2.4 Terugvoedende onderstations

Conventionele onderstations hebben een transformator die de stroom van het openbaar netwerk omzet van 10 kV wisselspanning naar 1,5 kV gelijkspanning. Normaal gesproken werkt dit alleen één richting op (van het openbaar netwerk naar de bovenleiding). Eventuele stroom die 'over' is op het netwerk van bovenleidingen kan niet terug worden geleverd aan het openbaar netwerk. Een terugvoedend onderstation is hiertoe wel in staat.

Deze maatregel behelst het plaatsen van een nieuw onderstation, met een bi-directionele gelijkrichter in het onderstation. Het gaat hier om een tamelijk innovatieve maatregel. Een prototype van de bi-directionele gelijkrichter is volgens deskundigen beschikbaar, maar inpassing in het net is tot op heden niet toegepast. Een terugleverend onderstation is op zichzelf geen energiebesparende maatregel. Wel kan het energiebesparing bij recuperatie faciliteren.

Deze maatregel is vooral effectief als er te veel stroom op het netwerk staat. Dit kan optreden als er door treinen veel regeneratief geremd wordt. Bij regeneratief remmen, of recupereren, werkt de elektrische motor van de trein als generator en kan de kinetische energie van het voertuig teruggewonnen en omgezet worden in elektriciteit (Ten Harve, 2012). Ongeveer de helft van het huidige Nederlandse treinwagpark bezit de mogelijkheid om te recupereren (Zoeteman, et al., 2014). Daarnaast heeft al het nieuwe materieel standaard recuperatiepotentieel. Als deze gerecupereerde elektriciteit niet binnen de trein gebruikt kan worden voor bijvoorbeeld verlichting of airco, en de stroom ook niet gebruikt kan worden om een trein in de buurt van tractie energie te voorzien, dan zou de stroom teruggeleverd kunnen worden aan het openbaar net. Testresultaten hebben bewezen dat vrijwel al het teveel aan stroom teruggezet kan worden naar wisselspanning in het distributienetwerk (Cornic, 2010).

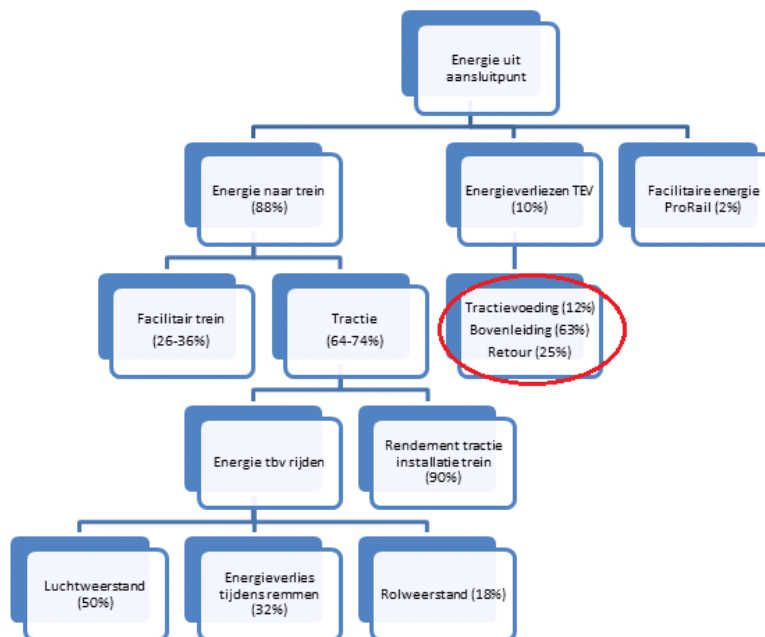
Bij dit terugleveren werd door de geraadpleegde deskundigen wel een belangrijke kanttekening gezet: het is zeer de vraag of de gerecupereerde elektriciteit marktwaarde heeft (oftewel, of er een vragende partij is die wil betalen voor de teruggeleverde elektriciteit). Het feit dat de momenten waarop er elektriciteit kan worden teruggeleverd sterk wisselen, en het alleen gaat om korte momenten van teruglevering maakt het nuttig inzetten ervan zeer lastig. Om deze redenen is ervoor gekozen om in de hoge schatting de monetaire waarde van de bespaarde energie op nul te zetten. In de lage schatting is de energiebesparing wel omgerekend naar een monetaire waarde.

In Tabel 5 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. Er wordt in beide gevallen aangenomen dat er vijf terugvoedende onderstations geplaatst worden. In Figuur 6 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 5 - Belangrijkste aannames: Terugvoedend onderstation

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	0,5	0,4
Eenmalige investeringskosten (mln €)	25,8	26,0
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	0,3	0,3
Levensduur	50	40
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 6 - Locatie van energiebesparing in de keten: Terugvoedend onderstation



3.2.5 Energieopslag langs het spoor

Deze maatregel betreft het plaatsen van batterij- of accupakketten langs het spoor waarin overgebleven recuperatie-energie kan worden opgeslagen. Het betreft dezelfde omvang aan recuperatie energie als bij de maatregel ‘Terugvoedende onderstations’. De opgeslagen energie kan op een later moment worden gebruikt door een passerende trein zodat er minder stroom afgenomen kan worden van het hoogspanningsnet. Energieopslag heeft het voordeel ten opzichte van terugleverende onderstations, dat er geen conversie (van 1,5 kV gelijkstroom naar 10 kV wisselstroom) nodig is. Zo kan in beginsel een groter deel van de overgebleven recuperatie-energie nuttig worden gebruikt t.b.v. de treindienst.

Accutechnologie is relatief duur. De meeste kosteninformatie over accuprijzen zijn afkomstig uit onderzoek naar elektrische auto’s. De kosten per kWh bedragen voor een elektrische auto tussen de € 200 en 300. Dit ligt redelijk in lijn met ‘stand-alone’ batterijpakketten, zoals de Tesla Powerwall. Deze kost ruim € 3.000 voor een opslagcapaciteit van 10 kWh. Naar verwachting zullen batterijen in de toekomst echter veel goedkoper worden. Een van de geraadpleegde experts wees ons op een case in Portugal waar 7 batterijpakketten zijn geplaatst in een metrosysteem waarbij ook remenergie wordt opgeslagen. De totale investeringskosten van deze 7 batterijpakketten bedroeg 7 miljoen euro. Als we aannemen dat de kosten van deze batterijen ook 200 à 300 €/kWh bedroegen dan kunnen we afleiden dat het in Portugal gaat om batterijpakketten met een maximale opslagcapaciteit van circa 30 megawattuur (MWh).

De maximale energie die in Nederland door middel van recuperatie ongebruikt kan blijven bedraagt 1-1,5% van het totale energieverbruik van de NS, aldus deskundigen. Dit komt overeen met circa 13 gigawattuur (GWh). Om al deze energie op te kunnen slaan zouden batterijen met een capaciteit langs het spoor moeten worden gezet met capaciteit die circa een factor 1.000 groter is dan die in de Portugese situatie. De kosten van de totale benodigde batterijcapaciteit zouden ook een factor 1.000



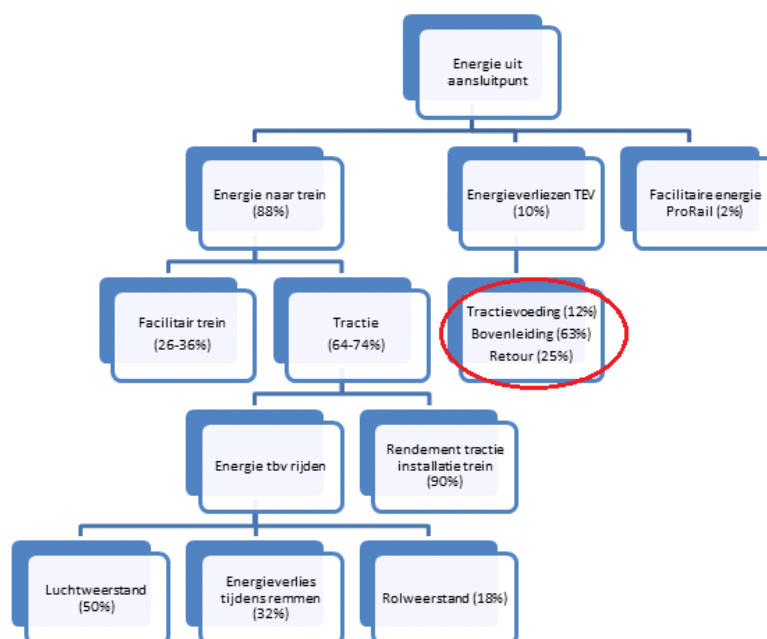
hoger worden. Dergelijk investeringen achten wij niet realistisch². Er is daarom verondersteld dat de energiebesparing bij deze maatregel 10% van de omvang van de besparing die de maatregel 'Onderstations bijplaatsen' oplevert. Op basis van dat energiebesparingspotentieel worden dan de bijbehorende kosten voor de batterijpakketten uitgerekend. Aan de hand van het COSTREAM-model van CE Delft zijn de batterijkosten voor de zichtjaren 2020 (€ 171) en 2030 (€ 65) geprojecteerd. Voor 2050 zijn dezelfde batterijkosten aangehouden als voor 2030. Deze maatregel wordt naar verwachting intensiever in onderhoud dan de algemene vuistregel, daarom is uitgegaan van onderhoudskosten van 10% van de investeringskosten.

In Tabel 6 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In Figuur 7 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 6 - Belangrijkste aannames: Energie opslag langs spoor

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	0,052	0,039
Eenmalige investeringskosten (mln €)	3,4	2,5
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	0,34	0,25
Levensduur	15	10
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 7 - Locatie van energiebesparing in de keten: Energie opslag langs spoor



² Weliswaar heeft de maatregel ook als voordeel dat er dubbel gebruik mogelijk is in het kader van netbalancing en ook is bijvoorbeeld opslag van productie van hernieuwbare energie door zonnepalen langs de infra mogelijk. Dit kan extra baten opleveren. Deze baten kunnen de zeer hoge kosten naar verwachting echter maar zeer beperkt reduceren.

3.2.6 Energieverliezen in componenten versneld reduceren

Alhoewel de titel van deze maatregel ‘componenten’ in meervoud bevat, blijkt dat experts onder deze maatregel maar één component verstaan: de transformator. De transformators in onderstations zetten de aangeleverde spanning om van 10 kV wisselspanning naar 1,5 kV gelijkspanning. Een tractietransformator moet omgaan met grote verschillen in de belasting. Zo is er in de nachturen sprake van nagenoeg geen belasting, terwijl de belasting in de spitsuren zeer hoog is. Een groot gedeelte van het energieverlies van een transformatie wordt bepaald door de zogenaamde nullastverliezen. De nullast is het verbruik van een transformator als de secundaire zijde niet belast wordt. Deze energie gaat verloren op momenten dat er geen trein in de buurt is die energie vraagt. De nullastverliezen kunnen worden beperkt door de huidige tractie transformatoren te vervangen door zogenaamde transformatoren met amorfe materialen die veel lagere nullastverliezen hebben (Ten Harve, 2012).

De amorfe transformator is een recente, innovatieve ontwikkeling uit Azië, en is momenteel nog niet beschikbaar op de Europese markt. Alhoewel het toepassen van amorfe transformatoren technisch haalbaar is, is het onduidelijk wanneer deze transformator ingezet kan worden.

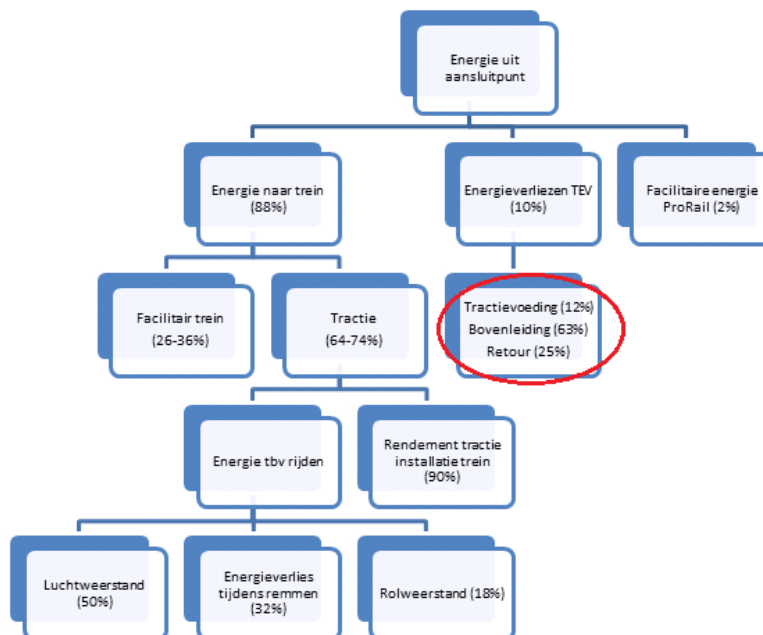
Deze maatregel verschilt in één opzicht van de andere maatregelen, de amorfe transformatoren worden namelijk gefaseerd ingevoerd. Gezien het feit dat de gemiddelde levensduur van een transformator ongeveer 60 jaar is, zullen amorfe transformatoren hun voorgangers pas vervangen op het moment dat die afgeschreven zijn. Er zijn momenteel ongeveer 400 transformatoren in Nederland. Als de techniek nu beschikbaar zou zijn, zou dat inhouden dat ieder jaar 1,7% van die 400 transformatoren vervangen wordt (circa 7 transformatoren per jaar). Dit zou inhouden dat in 2030 21,7% van de transformatoren in Nederland vervangen zou zijn. In 2050 zal dit 55% zijn. Zowel het besparingspotentieel als de kosten van deze maatregel groeien dus in de toekomst.

In Tabel 7 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In Figuur 8 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 7 - Belangrijkste aannames: Energieverliezen reduceren

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	0,1	0,1
Eenmalige investeringskosten (mln €) in 2030	2,3	2,4
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	<0,1	<0,1
Levensduur	60	60
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 8 - Locatie van energiebesparing in de keten: Energieverliezen reduceren



3.2.7 Rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein

Het ontwerp van de tractie-installatie in de trein is, de afgelopen jaren, qua rendement sterk verbeterd naar bijna 90%. Hierbij hoort een instelling die door middel van software kan worden geoptimaliseerd. Dat is nu nog niet overal het geval. Tijdens onderhoud van de installatie kan dit worden ingeregeld. Dit zorgt voor een rendementsverbetering van de tractie-installatie en kan daarmee energiebesparing opleveren.

Bij deze maatregel moet worden bedacht dat tractie-installaties in moderne treinen (die de komende jaren op het spoor zullen verschijnen) al zijn geoptimaliseerd. Het energiebesparingspotentieel van deze maatregel neemt dus na verloop van tijd af. In verband met de aankoop van nieuw materieel is voor 2030 en 2050 aangenomen dat de besparing van deze maatregel nog maar de helft van het potentieel bespaart.

In Tabel 8 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In Figuur 9 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 8 - Belangrijkste aannames: Rendementsverbetering tractie-installatie

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	9,5	4,1
Eenmalige investeringskosten (mln €)	0,3	0,5
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	< 0,1	< 0,1
Levensduur	50	40
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 9 - Locatie van energiebesparing in de keten: Rendementsverbetering tractie-installatie



3.2.8 Zuinig rijden

Bij deze maatregel gaat het om het beïnvloeden van het rijgedrag van de machinist. Bij zuinig rijden is het vooral van belang om de snelheid langzaam af te bouwen door nagenoeg niet te remmen. Zuinig rijden staat daarmee op gespannen voet met het verkorten van reistijden maar ook met remenergie terugwinnen (recuperatie). Voor recupereren is het nodig om snelheid te houden en juist krachtig te remmen. Een deel van de bijdrage aan energiebesparing door recupereren zal dus door het inzetten op zuinig rijden teniet worden gedaan.

De NS is al langer bezig om zuinig rijden beter bekend te maken onder machinisten. Momenteel loopt er een proef waarbij er een app is ontwikkeld (te gebruiken op smartphones en tablets) waarmee machinisten de aankomst op een station precies kunnen timen zodanig dat er geen reistijdverlies is en er minimaal geremd wordt. Volgens de deskundigen waarmee wij spraken is deze app zeer populair onder machinisten: hij is al door veel meer mensen gedownload dan de gebruikersgroep van de pilot groot is. Bereidheid van machinisten om mee te werken aan deze maatregel is zeer belangrijk voor de effectiviteit ervan.

De onderhoudskosten van deze maatregel zijn niet volgens de vuistregel berekend, maar via de jaarlijkse trainingsduur en uurloon van machinisten.

In Tabel 9 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven. In Figuur 10 is te zien hoe deze maatregel doorwerkt in energiebesparing.

Tabel 9 - Belangrijkste aannames: Zuinig rijden

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	47,4	24,6
Eenmalige investeringskosten (mln €)	0,1	0,1
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	< 0,1	< 0,1
Levensduur	50	40
Overig	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 10 - Locatie van energiebesparing in de keten: Zuinig rijden



3.2.9 Extra tractiemotoren in de SLT hangen

De Sprinter Lighttrain (SLT) heeft standaard al aandrijvingen aan beide zijden van de trein. Een SLT met een vierdelig treinstel heeft daarmee al twee motoren aan iedere kant. Een zesdelig treinstel heeft aan één zijde twee motoren en aan de andere zijde vier motoren. Deze maatregel behelst het vervangen van een niet-aangedreven draaistel door een draaistel met aandrijving zodat ze sneller kunnen optrekken en daarmee reistijdwinst kunnen behalen. De treinstellen zouden dan 6-8 motoren hebben. De extra tractiemotoren zullen meer stroom vragen en resulteren in een hogere aanzetversnelling. Daarmee leidt deze maatregel wel tot reistijdbaten, maar niet tot energiebesparing. De verhoogde massa van de trein door de extra motoren zou zelfs een negatief effect op het energieverbruik kunnen hebben.

In Tabel 10 zijn de belangrijkste verschillen tussen de hoge en lage schattingen van deze maatregel weergegeven.

Tabel 10 - Belangrijkste aannames: Extra tractiemotoren SLT

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	n.v.t.	n.v.t.
Eenmalige investeringskosten (mln €)	26,2	52,4
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	0,3	0,5
Levensduur	30	20
Overig	Reistijdbaten ter waarde van 3 mln €/jaar	Reistijdbaten ter waarde van 3 mln €/jaar

3.2.10 Vergroeningsmaatregelen voor regionaal ongeëlektrificeerd spoor

Een klein gedeelte van het railvervoer is niet elektrisch. Het gaat om een deel van de regionale passagierstreinen en daarnaast vracht- en rangeerlocomotieven. Deze rijden op diesel en stoten jaarlijks circa 80 kiloton CO₂ uit en 1,5 kiloton NO_x. Een klein deel daarvan komt voor rekening van personenvervoer: 31 kiloton CO₂ en 0,3 kiloton NO_x.

Er is in Nederland circa 560 kilometer ongeëlektrificeerd regionaal spoor. Het gaat om lijnen in Noord-Oost en Zuid-Nederland. Op 10% van deze trajecten is elektrificatie in voorbereiding en voor nog eens 15% is het besluit daartoe genomen. Er rijden ongeveer 150 twee- en driewagentreinstellen op deze lijnen waarvan 25 bij de NS (SER, 2015).

Naast elektrificatie zijn er twee oplossingsrichtingen om het dieselgebruik op de regionale lijnen te vervangen (SER, 2015):

- alternatieve brandstoffen zoals (bio-)LNG, biodiesel, waterstof en GTL;
- hybride oplossingen, zoals partiële elektrificatie (accutrein), diesel elektrische locomotief, LNG-hybride trein.

In deze studie hebben we de opties bio-LNG, elektrificatie en waterstoffreinen verder uitgewerkt.

Bio-LNG

Bio-LNG is één van de drie opties om het regionale spoor te vergroenen. First Dutch heeft onderzoek gedaan naar het potentieel van bio-LNG voor het vergroenen van het regionale spoor (First Dutch, 2014). Voor de overgang naar bio-LNG moet vooral het materieel omgebouwd worden. Grote investeringen in de infrastructuur zijn, in tegenstelling tot bij elektrificatie, niet nodig. Het feit dat bio-LNG momenteel nog niet op grote schaal geproduceerd wordt, maakt deze optie en de bijbehorende kosten onzeker. Verdere onzekerheden worden gekenmerkt door de ontwikkelingen op het gebied van productielocaties, distributiekanaalen, de prijs en de rol van de overheid (First Dutch, 2014). De belangrijkste aannames betreffende het inzetten van bio-LNG ter vergroening van het regionale spoor zijn samengevat in Tabel 11.

Elektrificatie

Om volledige elektrificatie van het regionale spoor te realiseren, dient langs het gehele baanvak een bovenleiding aangelegd te worden, compleet met bijbehorende onderstations. First Dutch heeft onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid en kosten van elektrificatie op het Nederlandse regionale spoor (First Dutch, 2014). In vergelijking met diesel treinen is elektrificatie van het spoor sneller, stiller en goedkoper in omlopen (door o.a. lagere aanschafprijs, lagere energiekosten, lagere onderhoudskosten en lagere handelingskosten van elektrisch materieel ten opzichte van dieselmaterieel) (First Dutch, 2014). Hier staat echter wel een hoge initiële investering in de infrastructuur (bovenleiding) tegenover. De belangrijkste aannames over de elektrificatie van de regionale spoorlijnen worden samengevat in Tabel 11.

Waterstoffreinen

Arcadis heeft recentelijk een onderzoek uitgevoerd naar het potentieel van batterij-waterstoffreinen in Nederland (Arcadis, 2016). De batterij-waterstoffrein is het meest interessant voor de spoorsector vanwege de kenmerkende vermogensbehoefte, namelijk een grote vermogensvraag bij de aanzet en een constante (lagere) vermogensvraag op de maximale snelheid (Arcadis, 2016). Een brandstofcel met voldoende vermogen kan voldoen aan de constante (lagere) vermogensvraag op maximale snelheid. Bij de aanzet is echter extra vermogen nodig, waarbij supercapacitoren ("supercaps") ingezet kunnen worden om de brandstofcel te ondersteunen. Deze supercaps kunnen weer opgeladen worden bij recupererend remmen.

In tegenstelling tot (partiële) elektrificatie, hoeft bij de ombouw naar waterstof veel minder geïnvesteerd te worden in de infrastructuur. Zo hoeven er geen dure bovenleidingen geplaatst te



worden, alleen voldoende tankinstallaties. Daarnaast is waterstof een schone brandstof, treden er in het proces nauwelijks verliezen op en heeft de brandstofcel een hogere efficiëntie dan dieselmotoren. De eerste waterstoffrein, de Coradia iLINT, wordt momenteel ontwikkeld door Alstom en in Duitsland op trajecten getest. Omdat deze techniek nog ontwikkeld wordt, zijn de kosten zoals ingeschat door Arcadis nog niet definitief. Toekomstige ontwikkelingen op het gebied van waterstoffreinen zouden het één en ander nog kunnen veranderen.

De belangrijkste aannames van de drie bovengenoemde opties voor het vergroenen van het regionale spoor worden met elkaar vergeleken in Tabel 11. De aannames betreffende de onderhoudskosten zijn in vergelijking met de huidige dieseltreinen. Qua onderhoudskosten kosten bio-LNG en elektrificatie evenveel als dieseltreinen. N.v.t. in Tabel 11 houdt daarmee in dat er geen meerkosten in het onderhoud zijn ten opzichte van dieseltreinen.

Tabel 11 - Belangrijkste aannames: Vergroenen regionaal spoor

	Bio-LNG	Waterstof	Elektrificatie
CO ₂ -besparing (kton/jaar)	31	31	31
Eenmalige investeringskosten (mln €)	181,5	164,9	761
Onderhoudskosten (mln €/jaar)	n.v.t.	1,8	n.v.t.
Levensduur	45	45	45
Bron	(First Dutch, 2014)	(Arcadis, 2016)	(First Dutch, 2014)

3.2.11 3 kV

De effecten van de maatregel 3 kV zijn in het kader van deze studie niet opnieuw ingeschat maar overgenomen uit de nieuwste MKBA van NS en ProRail (NS & ProRail, 2017).

Gezien de recente en verwachte toekomstgroei wordt het steeds duidelijker dat het Nederlandse spoor in zijn huidige vorm tegen zijn grenzen aanloopt. De NS en ProRail gaven in de operationele uitwerking van de Lange Termijn Spooragenda (LTSA) aan dat het verhogen van de netspanning naar 3 kV de voorkeursmaatregel is om hoogfrequente lijnvoeringsconcepten mogelijk te maken (NS en ProRail, 2014).

Het overschakelen naar 3 kV brengt verschillende baten met zich mee. Zo kunnen treinen sneller optrekken, kan er meer energie gerecupereerd worden en worden energieverliezen gereduceerd (Zoeteman et al., 2014; Paulussen et al., 2017; ProRail, 2015; NS & ProRail, 2017). Men kan dus concluderen dat er onder 3 kV aanzienlijk meer rendement kan worden gehaald (ProRail, 2015). Weliswaar neemt door het extra vermogen het energiegebruik met 3,5% toe. Hier staat tegenover dat met 3 kV de transportverliezen afnemen van 11 naar 4% (NS & ProRail, 2017). Daarnaast wordt er circa 16% minder energie verbruikt door de toegenomen recuperatiepotentieel (NS & ProRail, 2017). Ten opzichte van de huidige situatie kan er met 3 kV per saldo 19,5% minder energie worden ingekocht (Paulussen et al., 2017; ProRail, 2015; NS & ProRail, 2017).

De input voor de berekende kosteneffectiviteit van CO₂-reductie komt uit de meest recente MKBA (NS & ProRail, 2017). Als input voor onze berekeningen wordt een gemiddelde van de twee scenario's uit de MKBA gebruikt. Verder worden de kosten en baten, uitgedrukt in netto contante waarde, gedeeld door de levensduur van de 3 kV-maatregel om tot jaarlijkse kosten en baten te komen. Bij het berekenen van de jaarlijkse baten wordt de monetaire waarde van de afname in CO₂-emissies niet meegenomen. Bij het berekenen van de CO₂-kosteneffectiviteit worden de jaarlijkse kosten min baten afgezet tegen de jaarlijkse CO₂-reductie. Het zou daarom onlogisch zijn om de monetaire waarde van de CO₂-reductie al mee te nemen in de baten.

De levensduur van 3 kV is in de MKBA vastgesteld op 40 jaar. In onze berekeningen gebruiken wij voor veel van de andere maatregelen die besproken zijn de levensduur van 40 jaar in de hoge schatting en 50 jaar in de lage schatting. Om consistentie in de berekeningen te behouden zetten wij deze trend ook door bij het uitdrukken van de CO₂-kosteneffectiviteit van deze maatregel.

Tabel 12 - Belangrijkste aannames: 3 kV

	Laag	Hoog
Energiebesparing in 2030 (GWh/jaar)	327,4	327,4
Kosten totaal (mln €)	1775	1775
Baten totaal – monetaire CO ₂ -baten (mln €)	1315	1315
Levensduur	50	40
Overig	Monetaire waarden uitgedrukt in CW 2020, prijspeil 2017	Monetaire waarden uitgedrukt in CW 2020, prijspeil 2017

4 Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk presenteren we wat het besparingspotentieel en de kosteneffectiviteit van 3 kV en de alternatieve energiebesparingsmaatregelen op het spoor zoals besproken in Hoofdstuk 3. De effecten en kosteneffectiviteit van 3 kV zijn reeds eerder ingeschat in (CE Delft, 2016) maar voor deze studie geactualiseerd op basis van nieuwe inzichten en de meest recente MKBA (NS & ProRail, 2017). Vanwege de grote verschillen tussen de oude MKBA, waar 3 kV netto baten had, en de nieuwe MKBA, waar 3 kV netto kosten heeft, verandert de kosteneffectiviteit van negatief in de vorige studie, naar positief in deze studie.

We gaan in dit hoofdstuk eerst in op de CO₂-reductie en energiebesparing van alle maatregelen en hoe deze zich onderling verhouden. Daarna vergelijken we de kosteneffectiviteit van de maatregelen met elkaar. Tot slot kijken we hoe de berekende CO₂-reducties zich verhouden tot de nationale CO₂-uitstoot.

We geven in dit hoofdstuk de effecten van afzonderlijke maatregelen. Er dient bedacht te worden dat niet alle maatregelen tegelijkertijd geïmplementeerd kunnen worden, sommigen zijn in combinatie (veel) minder effectief en anderen werken elkaar zelfs tegen.

4.2 CO₂-reductie en energiebesparing

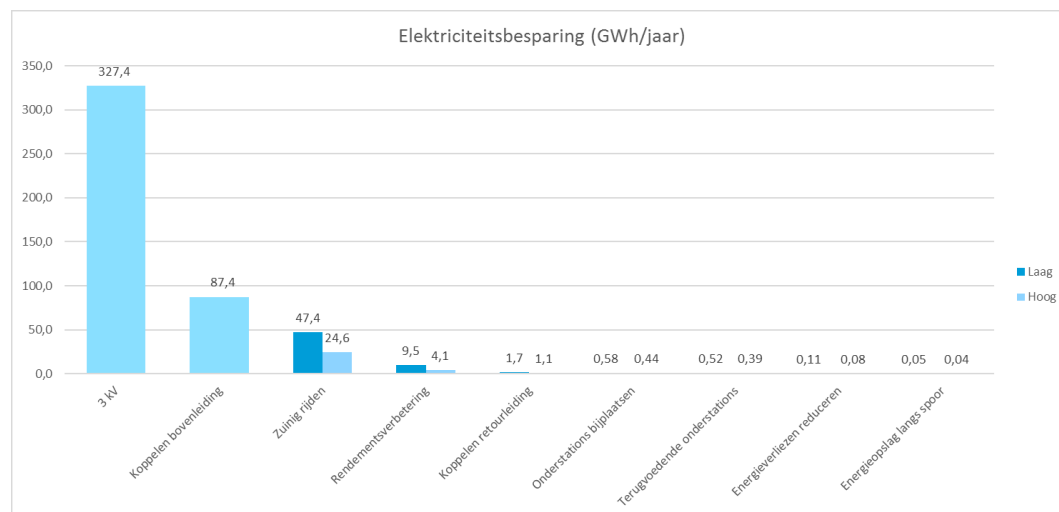
In deze paragraaf worden de resultaten van de elektriciteitsbesparing en CO₂-besparing van de verschillende maatregelen gepresenteerd voor het jaar 2030. Voor de resultaten voor 2050 verwijzen wij naar Bijlage C. De elektriciteitsbesparing is berekend aan de hand van een percentage van het totale verbruik. Het totale verbruik van de NS is dan ook geprojecteerd naar de toekomst, rekening houdend met onder andere reizigersgroei en energiebesparingsdoelstellingen. Omdat het totale verbruik per jaar verschilt, verschilt ook de grootte van de elektriciteitsbesparing van de verschillende maatregelen. De figuren in dit hoofdstuk zijn dan ook gecreëerd voor het zichtjaar 2030.

Figuur 11 illustreert de elektriciteitsbesparing van de verschillende maatregelen in het jaar 2030, waarbij er gekeken wordt naar een bandbreedte, met een lage en een hoge schatting. In de lage schatting wordt gerekend met lage kosten en grote energiebesparingseffecten. In de hoge schatting wordt gerekend met hoge kosten en kleine energiebesparingseffecten. Voor de precieze aannames die bij de verschillende maatregelen gemaakt worden verwijzen wij terug naar Paragraaf 3.2. Voor de maatregel “3 kV” en “Koppelen bovenleiding” is het besparingspotentieel gelijk in zowel de hoge als de lage schatting. Dit komt doordat deze waarden gebaseerd zijn op andere studies, in plaats van expert inschattingen.

Van de verschillende maatregelen die onder de loep genomen zijn, blijkt dat 3 kV de maatregel is met het grootste elektriciteitsbesparingspotentieel. Op grote afstand volgen de maatregelen “Koppelen bovenleiding”, “Zuinig rijden” en “Rendementsverbetering van de tractie-installatie”. Het effect van de overige maatregelen is qua orde grootte een stuk kleiner en varieert van 0.04-1.73 GWh. Twee maatregelen zijn niet meegenomen in Figuur 11. “Extra tractiemotoren in de SLT plaatsen” is buiten beschouwing gelaten omdat uit gesprekken met deskundigen bleek dat deze maatregel geen energiebesparing oplevert. Het “Vergroenen van het regionale spoor” is niet meegenomen in Figuur 11, omdat deze maatregel niet direct elektriciteit bespaart. De maatregel is wel meegenomen in Figuur 12, omdat hij CO₂ reduceert.

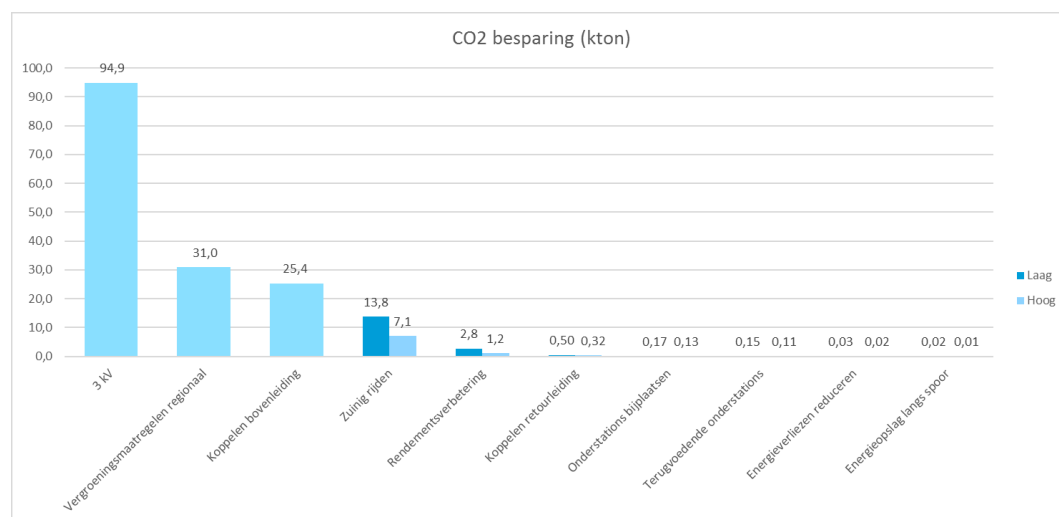
Voor alle maatregelen wordt de elektriciteitsbesparing geïllustreerd aan de hand van twee schattingen. Voor de specifieke aannames achter de hoge en lage schattingen zie Paragraaf 3.2. Bij sommige maatregelen zijn de verschillende schattingen pas zichtbaar bij het berekenen van de CO₂-kosteneffectiviteit (in Paragraaf 4.3).

Figuur 11 - 2030: Elektriciteitsbesparing in GWh/jaar



In Figuur 12 is de elektriciteitsbesparing uit Figuur 11 omgerekend naar CO₂-reductie. Vanwege dezelfde emissiefactor is er een één-op-één relatie tussen elektriciteitsbesparing (Figuur 11) en CO₂-besparing (Figuur 12). Het vergroenen van het regionale spoor is in Figuur 12 wel meegenomen. Op 3 kV na heeft deze maatregel het grootste CO₂-reductiepotentieel.

Figuur 12 - 2030: CO₂-besparing in kiloton



Een cruciale factor in de berekeningen achterliggend aan Figuur 12 is een aanname over de CO₂-uitstoot van elektriciteitsopwekking. Zoals aangegeven in Paragraaf 2.3 zijn er twee verschillende aanpakken mogelijk. De resultaten in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op de prognoses van CE Delft betreffende de CO₂-intensiteit van elektriciteitsopwekking, en verschillen daarmee van de aanpak in de MKBA. In het algemeen is, per maatregel, de grootte van de CO₂-besparing groter met de aanpak uit de nieuwe MKBA (NS & ProRail, 2017). Voor dezelfde figuren, maar dan gebaseerd op de aanpak uit de MKBA verwijzen wij naar Bijlage B.



4.3 CO₂-kosteneffectiviteit

Voor het berekenen van de kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie worden de netto jaarlijkse kosten (jaarlijkse kosten min jaarlijkse baten) gedeeld door de omvang van de CO₂-reductie die de maatregel teweegbrengt.

Een negatieve kosteneffectiviteit houdt in dat de maatregel CO₂ reduceert, maar ook dat de jaarlijkse baten de jaarlijkse kosten overtreffen. Per saldo levert een kosteneffectiviteit van -100 €/ton CO₂, € 100 op per ton CO₂.

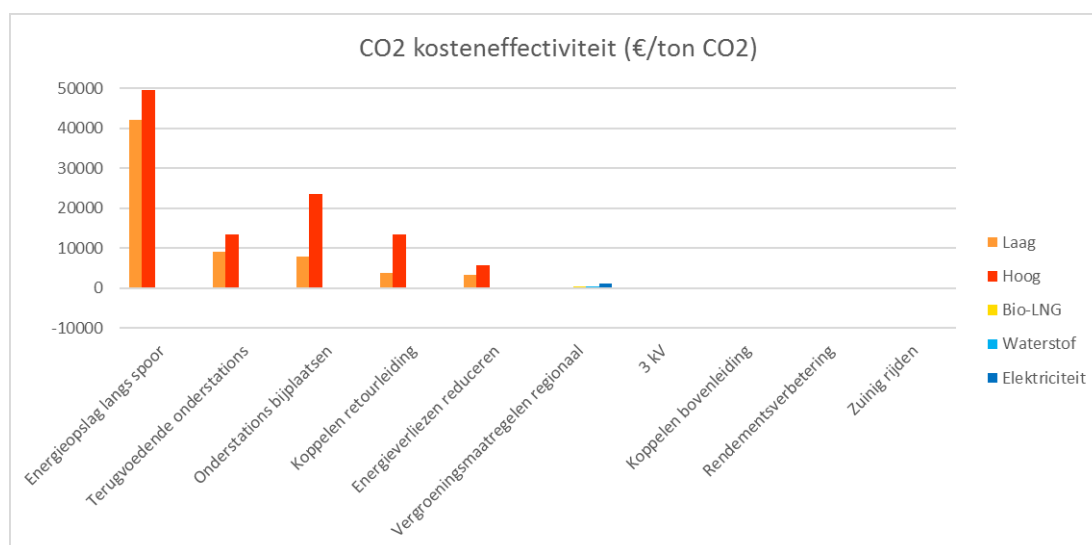
Een positieve kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie houdt in dat het reduceren van CO₂ geld kost. Als voorbeeld, € 100/ton CO₂ houdt in dat het reduceren van 1 ton CO₂ € 100 kost.

Maatregelen met een negatieve kosteneffectiviteit leveren dubbel voordeel op, CO₂-reductie en financieel voordeel. Het implementeren van maatregelen met een positieve CO₂-kosteneffectiviteit kost juist geld.

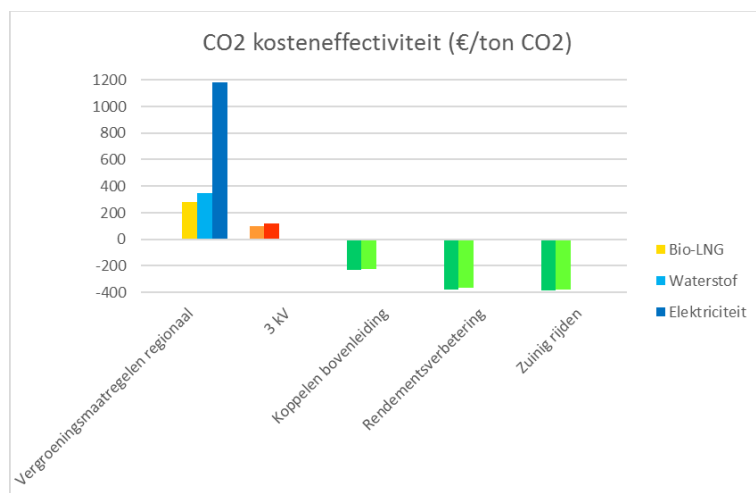
In Figuur 13 is de berekende kosteneffectiviteit van de CO₂-reductie door de verschillende maatregelen voor 2030 te zien. Voor de resultaten voor 2050 verwijzen wij naar Bijlage C. Er is een grote variatie zichtbaar, met de duurste maatregel die € 45.000 per gereduceerde ton CO₂ kost. Voor de maatregel “Vergroenen van het regionale spoor” is onderscheid gemaakt naar de drie opties die behandeld zijn in Paragraaf 3.2.10. Hieruit blijkt dat elektrificatie van het regionale spoor de hoogste CO₂-kosteneffectiviteit heeft. Dat wil zeggen dat elektrificatie een duurdere manier is om één ton CO₂ te reduceren dan waterstof of bio-LNG-treinen inzetten. Hierbij moet wel de kanttekening geplaatst worden dat, indien er gekozen wordt voor elektrificatie, een aantal andere energiebesparingsmaatregelen die in deze studie genoemd worden nog toegepast kunnen worden op het regionale spoor. Dit is bij het overstappen op waterstof of bio-LNG niet het geval. De maatregel “Extra tractiemotoren in de SLT plaatsen” is buiten beschouwing gelaten omdat bleek dat deze maatregel geen energie bespaart.

Vanwege de schaal van de assen is het in Figuur 13 niet goed te zien, maar er zijn enkele maatregelen met een negatieve kosteneffectiviteit, die geld opleveren per gereduceerde ton CO₂. In Figuur 14 is verder ingezoomd op dat gedeelte van de van de figuur.

Figuur 13 - 2030: CO₂-kosteneffectiviteit



Figuur 14 - 2030: CO₂-kosteneffectiviteit (selectie maatregelen)



Uit Figuur 14 blijkt dat drie maatregelen per saldo geld opleveren (groen gekleurd). Deze maatregelen, “Koppelen van de bovenleiding”, “Rendementsverbetering van de tractie-installatie” en “Zuinig rijden”, hebben jaarlijkse baten die hoger zijn dan de jaarlijkse kosten, en reduceren daarnaast ook nog eens CO₂. Per gereduceerde ton CO₂ leveren ze respectievelijk gemiddeld 228, 371 en 383 euro op.

De 3 kV-maatregel heeft een gemiddelde CO₂-kosteneffectiviteit van € 109 per gereduceerde ton CO₂. In het volgende hoofdstuk zullen we zien dat dit qua kosteneffectiviteit tussen het verhogen van de bijmenging van biobrandstoffen en grootschalige zonne-energie in valt (zie Hoofdstuk 5). Het reduceren van één ton CO₂ via 3 kV kost dus € 109. Dit staat in contrast met de waarde uit de vorige CE Delft-studie, waaruit bleek dat de CO₂-kosteneffectiviteit van 3 kV € -315 per ton CO₂ was. De vorige CE Delft-studie was echter gebaseerd op de oude MKBA (ProRail & NS, 2015), terwijl de onderhavige studie gebaseerd is op de meest actuele MKBA (NS & ProRail, 2017). In de meest recente MKBA overtreffen de baten de kosten, wat leidt tot een positieve kosteneffectiviteit.

4.4 Aandeel CO₂-reductie in nationale uitstoot

Ter illustratie is ook de grootte van de CO₂-besparing van de verschillende maatregelen ten opzichte van de totale CO₂-uitstoot van Nederland berekend. Omdat de spoorsector al een zeer zuinige sector is, is deze besparing klein gebleken, zelfs voor de maatregelen met het grootste besparingspotentieel.

Tabel 13 - Besparingspotentieel van een selectie maatregelen in 2030

	% van totale CO ₂ -uitstoot Nederland
3 kV	0,057
Vergroeningsmaatregelen regionaal spoor	0,018
Koppelen bovenleiding	0,015
Zuinig rijden	0,006

Zoals Tabel 13 illustreert is zelfs de 3 kV-maatregel, die van alle behandelde maatregelen het grootste CO₂-reductiepotentieel heeft, slechts verantwoordelijk voor een jaarlijkse besparing ter grootte van 0,057% van de CO₂-uitstoot van Nederland in 2030.

5 Energiebesparingsmaatregelen in een breder perspectief

5.1 Inleiding

Een apart onderdeel in deze studie betreft de actualisatie van de vergelijking van 3 kV en de alternatieve spoormaatsregelen met energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatsregelen in andere economische sectoren zoals uitgevoerd in CE Delft (2016). In dit hoofdstuk presenteren we de resultaten van die actualisatie. We voegen aan die vergelijking het effect van de nieuwe spoormaatsregelen toe zoals besproken in Hoofdstuk 3 en 4.

De methodiek en kentallen die zijn gehanteerd in CE Delft (2016) zijn voor deze studie nogmaals tegen het licht gehouden, met als doel om te bekijken of er updates nodig waren door het beschikbaar komen van recente inzichten. Bij aanvang van de studie leken met name de dalende kosten van wind op zee (één van de maatregelen waarmee we 3 kV vergelijken) interessant³. Het resultaat van deze check was echter dat er geen recente, publieke data beschikbaar is op basis waarvan we de berekeningen uit CE Delft (2016) kunnen updaten. Vandaar dat we voor deze studie van dezelfde (kosten)kentallen zijn uitgegaan als in CE Delft (2016). De oude studie is geactualiseerd door rekening te houden met de inflatie, alsmede de actualisatie van de brandstof- en elektriciteitsprijzen.

In het vervolg van dit hoofdstuk presenteren we allereerst de hernieuwbare energie en energiebesparingsmaatregelen waarmee we beide tractie-energiemaatsregelen hebben vergeleken. Vervolgens gaan we in op de vergelijking van de effectiviteit (energiebesparing en CO₂-reductie) en kosteneffectiviteit van de verschillende maatregelen.

5.2 Overzicht maatregelen

Een overzicht van de (niet-spoorgerelateerde) maatregelen waarmee de (kosten)effectiviteit van 3 kV en de alternatieve spoormaatsregelen zijn vergeleken is weergegeven in Tabel 14. Een uitgebreidere beschrijving van deze maatregelen, alsmede van de wijze waarop hun (kosten)effectiviteit is bepaald, kan worden gevonden in CE Delft (2016).

We merken hier op dat de maatregelen zeer verschillend van aard zijn. Voor sommige maatregelen zijn bijvoorbeeld de totale investeringskosten veel hoger dan voor andere. Hierdoor kunnen de maatregelen ten aanzien van de effectiviteit op CO₂-reductie en energiebesparing niet één op één met elkaar worden vergeleken. Echter, bij de vergelijking van de kosteneffectiviteit vallen deze verschillen tegen elkaar weg. Voor een goede vergelijking van de verschillende niet-spoorgerelateerde maatregelen met 3 kV kan dus het best worden gekeken naar de kosteneffectiviteit.

³ Bij de aanbesteding van kavels III en IV van windenergiegebied Borssele vielen de kosten aanzienlijk lager uit dan vooraf ingeschat. Echter, de biedingen voor deze kavels zijn niet openbaar en daarom niet bruikbaar voor deze studie. Op basis van ECN (2017), die wel inzicht hebben gehad in deze gegevens, concluderen we echter dat de kosteneffectiviteit die wij in deze studie voor Wind op Zee inschatten in de juiste ordegrootte ligt.



Tabel 14 - Overzicht van maatregelen

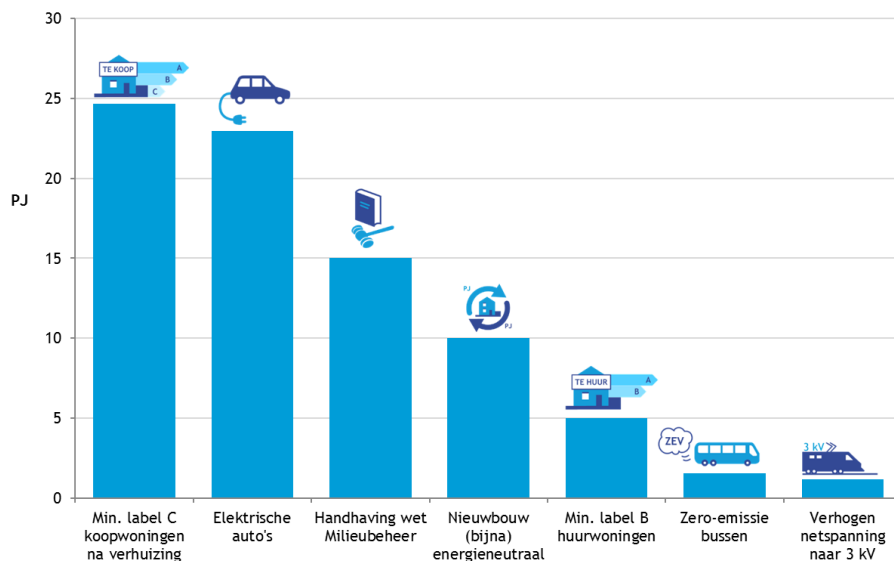
Maatregel		Korte omschrijving
	Elektrische auto's	Twee miljoen elektrische auto's in 2030
	Zero-emissie bussen	In 2030 rijden alle OV-bussen op elektriciteit, waterstof of groen gas
	Verhoging bijmenging biobrandstoffen	Fysieke bijmenging biobrandstoffen worden verhoogd van 7 naar 12%
	Minimaal label C koopwoningen na verhuizing	Vanaf 2017 dienen alle koopwoningen binnen twee jaar na verhuizing naar label C verbeterd te worden
	Nieuwbouw (bijna) energieneutraal	Vanaf 2020 moeten alle nieuwe woningen bijna energieneutraal te zijn
	Minimaal label B huurwoningen	In 2020 hebben alle sociale huurwoningen minimaal label B
	Handhaving wet milieubeheer	Striktere handhaving van treffen energiebesparende maatregelen bij instellingen en bedrijven
	Wind op Land	Opgesteld vermogen van 6.700 MW in 2030
	Wind op Zee	Opgesteld vermogen van 4.450 MW in 2023
	Grootschalige zonne-energie	Opgesteld vermogen van 8.000 MW in 2030
	Bijstook van biomassa	Bijstook van 37 PJ biomassa in kolencentrales in 2030.

5.3 Vergelijking energiebesparing en CO₂-reductie

De energiebesparing die wordt gerealiseerd bij toepassing van 3 kV is in Figuur 15 vergeleken met andere energiebesparingsmaatregelen⁴. Hierbij gaat het om de jaarlijkse energiebesparing in 2030.

⁴ Merk op dat de hernieuwbare energiemaatregelen (bijv. Wind op Zee) niet leiden tot energiebesparing en daarom niet zijn meegenomen in deze analyse.

Figuur 15 - Vergelijking van effectiviteit energiebesparingsmaatregelen *

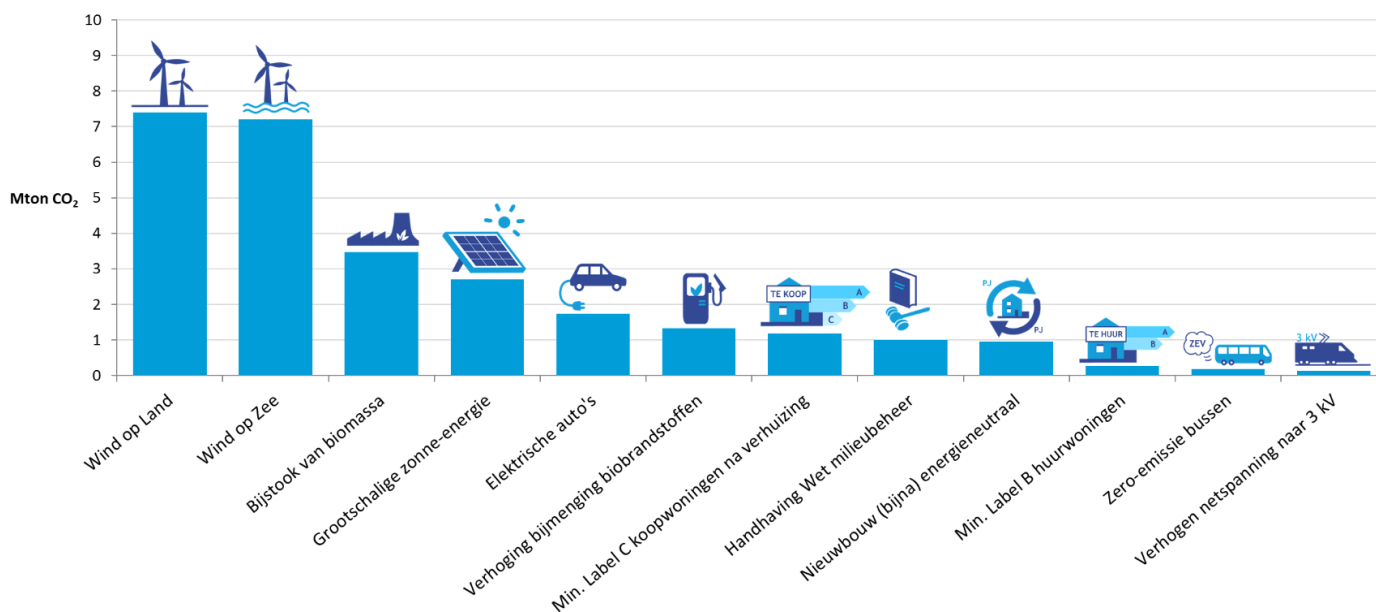


* De maatregelen zijn zeer verschillend van aard. Voor sommige maatregelen zijn bijvoorbeeld de totale investeringskosten veel hoger dan voor andere. Hierdoor kunnen de maatregelen ten aanzien van de effectiviteit op energiebesparing niet één op één met elkaar worden vergeleken.

In vergelijking met sommige andere maatregelen zijn de effecten van het implementeren van 3 kV beperkt. Dit is het gevolg van het relatief kleine aandeel van de spoorsector in het energiegebruik in Nederland gecombineerd met het feit dat de spoorsector al relatief zuinig is.

Een vergelijking van de CO₂-reductie die wordt gerealiseerd bij de verschillende maatregelen is weergegeven in Figuur 16 (jaarlijkse reductie in 2030). Evenals bij energiebesparing geldt dat de CO₂-reductie van 3 kV beperkt is in vergelijking met veel van de andere maatregelen, wat het gevolg is van het beperkte aandeel van spoorvervoer in het totale Nederlandse energiegebruik. Verder is het ook belangrijk om te realiseren dat de onderstaande figuur inzicht geeft in het potentieel van de CO₂-reductie die een bepaalde maatregel teweeg kan brengen, zonder dat hierbij rekening gehouden wordt met de kosten die daaraan verbonden zijn. Zo kunnen wind op zee en wind op land de grootste hoeveelheid CO₂ reduceren, terwijl ze ook de duurste maatregelen zijn, met respectievelijk ruim 12 en 9 miljard euro. De kosten gelinkt aan het invoeren van 3 kV vallen dan een stuk lager uit, met 1,75 miljard euro.

Figuur 16 - Vergelijking CO₂-reductie *



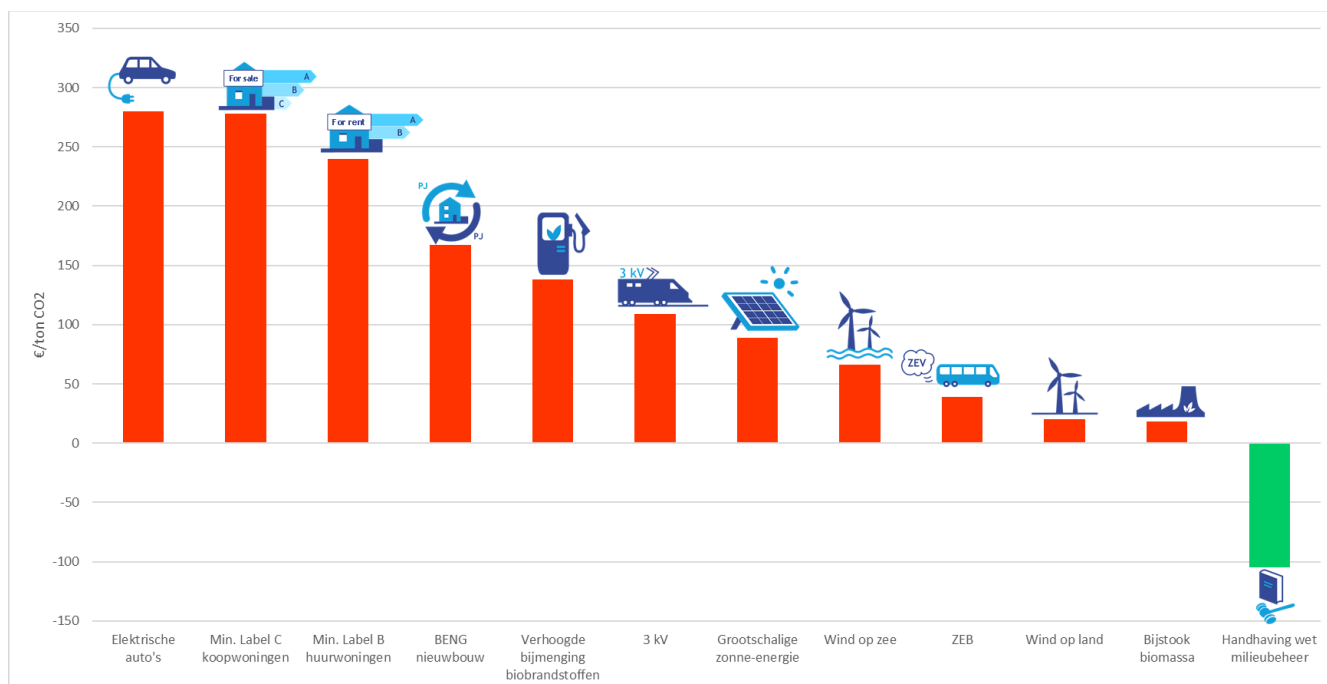
* De maatregelen zijn zeer verschillend van aard. Voor sommige maatregelen zijn bijvoorbeeld de totale investeringskosten veel hoger dan voor andere. Hierdoor kunnen de maatregelen ten aanzien van de effectiviteit op CO₂-reductie niet één op één met elkaar worden vergeleken.

5.4 Vergelijking CO₂-kosteneffectiviteit

Figuur 17 geeft een vergelijking van de CO₂-kosteneffectiviteit van de invoering van 3 kV en de overige energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatregelen. Invoering van 3 kV lijkt relatief gemiddeld te scoren met een kosteneffectiviteit van gemiddeld € 109 per ton vermeden CO₂. In andere woorden, per bespaarde ton CO₂ betaalt de maatschappij netto kosten van € 109.

Van alle maatregelen die meegenomen zijn is de handhaving van de wet milieubeheer de enige die een negatieve kosteneffectiviteit heeft. Dat houdt in dat die maatregel per bespaarde ton CO₂ de maatschappij netto baten van € 105 euro oplevert. De minst kosteneffectieve maatregel is het invoeren van de eis van 2 miljoen elektrische auto's in 2030. Hiervoor zou de maatschappij € 280 netto kosten betalen per bespaarde ton CO₂.

Figuur 17 - 2030: Vergelijking CO₂-kosteneffectiviteit



Het grote verschil tussen deze figuur en die in de vorige studie is de sprong die 3 kV gemaakt heeft. In de vorige studie was de CO₂-kosteneffectiviteit berekend op € -315 per ton CO₂. In deze studie is dit bijgewerkt naar € 105 per ton CO₂. Het grote verschil tussen deze twee getallen is te wijten aan de gegevens waar deze berekeningen op gebaseerd zijn, namelijk de MKBA uit 2015 (ProRail & NS, 2015) en de MKBA uit 2017 (NS & ProRail, 2017). In de eerste MKBA werden er nog netto baten berekend voor de implementatie van 3 kV. In de meest recente versie is dit bijgesteld naar netto kosten, waardoor de kosteneffectiviteit van de maatregel niet meer negatief kan zijn. De volgorde maar ook ordegraote van de CO₂-kosteneffectiviteit van de andere maatregelen is niet of nauwelijks veranderd ten opzichte van onze vorige studie.

6 Toerekening CO₂-effecten

Doordat de NS haar treinen op hernieuwbare elektriciteit (uit wind) laat rijden, leidt energiebesparing niet direct tot CO₂-besparing. Indirect is er echter wel sprake van CO₂-reductie; immers, doordat er minder hernieuwbare energie nodig is voor het spoorvervoer kan er in andere sectoren meer hernieuwbare energie worden ingezet, waardoor er in die sectoren minder grijze stroom hoeft te worden ingezet. De hiermee gepaard gaande indirecte CO₂-reductie mag worden toegerekend aan *energiebesparende maatregelen*.

De vraag is echter in hoeverre de bespaarde hoeveelheid CO₂ ook toegerekend mag worden aan de spoorsector. Immers, ook de economische sector die gebruik gaat maken van de windenergie die extra beschikbaar komt door de energiebesparing zal dit effect aan zichzelf willen toerekenen. Dit vraagstuk zullen we in dit hoofdstuk verder onderzoeken. Allereerst geven we kort wat achtergrondinformatie over de inkoop van groene stroom, in het geval van de NS elektriciteit uit wind.

6.1 Werking groene stroom

In Figuur 18 is op vereenvoudigde en schematische wijze weergegeven hoe de inkoop van groene stroom werkt waardoor de treinen van de NS op Nederlandse windenergie kunnen rijden.

Figuur 18 - Inkoop windenergie door de NS



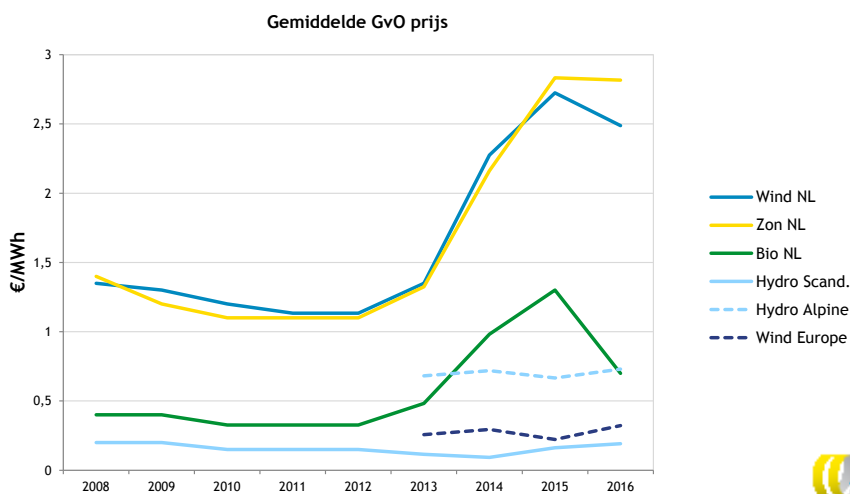
Hierbij is de fysieke levering (blauwe lijnen) losgekoppeld van de contractuele afspraken en de overdracht van de garanties van oorsprong (GvO's). Bij de fysieke levering van elektriciteit kan geen onderscheid gemaakt worden tussen elektriciteit uit verschillende bronnen⁵. Om de herkomst van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen te garanderen wordt er bij de productie van hernieuwbare elektriciteit voor elk megawattuur (MWh) een GvO aangemaakt. Hier staat onder andere de bron van elektriciteit op en het land van herkomst. De GvO's worden uitgegeven aan de producent van de hernieuwbare elektriciteit. De GvO's kunnen vervolgens los van de elektriciteit verkocht worden aan

⁵ Tenzij er bijvoorbeeld sprake is van zogenoemde levering achter de meter (zonnepanelen op je dak), maar dat is in de casus van de NS niet aan de orde.

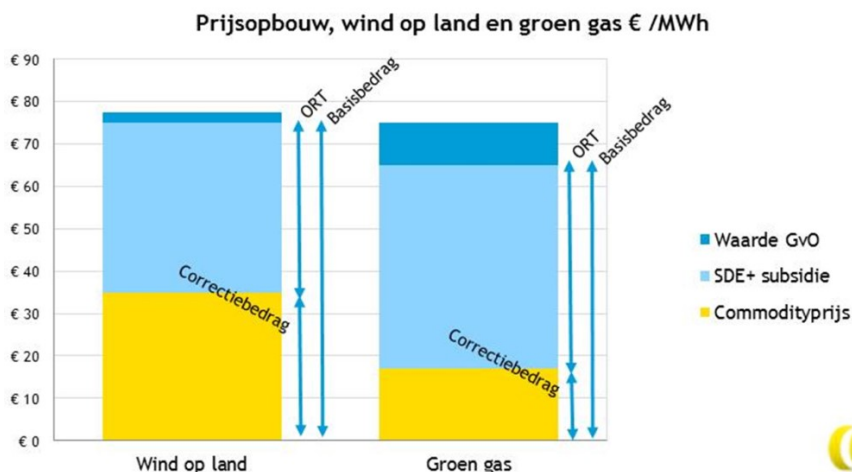
derden, in dit geval de NS. De prijs die betaald wordt voor de GvO, en het aantal jaar dat de afname van de GvO's gegarandeerd is, is vaak een bilaterale afspraak tussen twee partijen. De NS heeft voor de afname van GvO's een langjarig contract afgesloten met Eneco waarbij de GvO's afkomstig zijn van windenergie uit onder andere Nederland, Scandinavië en België.

De prijs van een GvO voor elektriciteit van windenergie op land was in 2016 gemiddeld +/- € 2,50/MWh (zie Figuur 19)⁶⁷. Om dit in perspectief te kunnen plaatsen is in Figuur 20 de prijsopbouw van o.a. wind op land weergegeven. Onder de figuur wordt dit verder toegelicht.

Figuur 19 - Gemiddelde GvO prijs



Figuur 20 - Prijsopbouw, wind op land en groen gas €/MWh



⁶ Het is niet bekend wat de NS voor de afname van de GvO's betaald.

⁷ Merk op dat er in het Winterpackage van de Europese Commissie van 30 november 2016 (EC, 2016) voorstellen zijn gedaan om het systeem van GvO's te hervormen voor de periode 2020-2030. Dit zijn nog slechts voorstellen en er is daarom nog geen zekerheid over de uitwerking ervan. Dit soort beleidswijzigingen kunnen echter wel van invloed zijn op de prijs van GvO's en beslissingen in het kader van energiebesparing. Omdat er nog niets besloten is kunnen we hier echter nu geen verdere uitspraken over doen.



Een MWh elektriciteit kost ongeveer € 75/MWh om te produceren. Op de elektriciteitsmarkt levert een MWh ongeveer € 35/MWh op (het correctiebedrag). Om de producent hiervoor te compenseren kan hij hiervoor SDE+ aanvragen. De hoogte van het SDE+ bedrag voor wind op land is hier ongeveer € 75/MWh (het basisbedrag). Hier wordt de opbrengst op de markt (hier € 35/MWh) in mindering gebracht waardoor het gat van € 40/MWh (de onrendabele top (ORT)) vergoed wordt. De opbrengsten uit GvO's komen hier bovenop, maar zijn dus an sich onvoldoende om de zogenaamde 'meerkosten' of ORT voor wind op land te dekken. Wel dragen ze bij om de businesscase voor wind op land voor de projectontwikkelaar te verbeteren en eventuele risico's (zoals te sterke daling van het correctiebedrag) te verminderen.

6.2 Groene stroom en CO₂-monitoringsprotocollen

Conform verschillende monitoringsmethoden (Greenhousegas-protocol of CO₂-prestatieladder) geldt dat, op het moment dat je groene stroom koopt (uit Nederland) en dit middels de GvO's kan aantonen, de CO₂-uitstoot per verbruikte kWh 0 gram/kWh of zeer laag is. Volgens deze twee meest voorkomende monitoringsmethodieken zal de reductie van deze elektriciteit door besparende maatregelen dus niet leiden tot eenzelfde CO₂-reductie.

De NS verbruikte in 2016 1.296 GWh energie per jaar (NS, 2017). Door groene stroom in te kopen is de CO₂-uitstoot van deze elektriciteit conform de genoemde protocollen 0 of nihil. Of de NS nu dus 1.296 of 1.000 GWh verbruikt, de CO₂-uitstoot blijft 0 of nihil. Hoewel er wel sprake is van elektriciteitsreductie (en daarmee energiebesparing) is er, conform de monitoringsmethodieken, dus geen sprake van CO₂-reductie.

Je kan hierbij aanvoeren dat er, doordat je minder GvO's afneemt deze vrijkomen voor een andere partij die hierdoor de mogelijkheid heeft om van grijze stroom over te stappen op groene stroom. Deze CO₂-reductie komt echter, conform het Greenhousegas-protocol en de CO₂-prestatieladder toe aan de partij die de GvO's afneemt en niet de partij die ze niet meer afneemt.

6.3 Toerekeningsvraagstuk

In voorgaande paragrafen is de context rondom groene stroom geschetst, en is aangegeven hoe omgegaan wordt met de CO₂-uitstoot van groene stroom volgens twee belangrijke monitoringsprotocollen. In deze paragraaf schetsen we de twee belangrijkste allocatiemethoden om energie- of CO₂-besparing toe te rekenen aan partijen, en geven we de toepasbaarheid voor de NS weer. Alhoewel het een interessante discussie is om uit te rekenen hoeveel reductie de NS mag claimen, is het belangrijk om te highlighten dat de volledige CO₂-reductie die plaatsvindt als gevolg van energiebesparingsmaatregelen Nederland als geheel ten goede komt.

De twee belangrijkste, en meest relevante allocatiemethoden zijn 'economische allocatie' en 'allocatie op basis van eigendom van GvO's'. Beide methoden worden hieronder toegelicht.

Economische allocatie

Bij economische allocatie komt het erop neer dat degene die betaalt voor de energiebesparing, of de CO₂-reductie deze ook aan zich mag toerekenen (of naar rato indien er meerdere financieringsbronnen zijn). Deze methode wordt veel toegepast bij bijvoorbeeld het monitoren van zogenaamde 'ketenmaatregelen' binnen de meerjarenafspraak.



Het deel dat de NS per kWh (indirect) betaalt aan hernieuwbare elektriciteit bestaat dus uit de prijs van de GvO's en de ODE-heffing. Het is niet bekend wat de NS per afgenomen GvO betaalt, maar we gaan hier uit van € 2,50/MWh. De ODE heffing voor het zakelijke gebruik was in 2016 ook +/- € 2/MWh. De totale bijdrage aan de hernieuwbare elektriciteit is dus ongeveer € 4,50/MWh. Zoals uit Figuur 20 blijkt is de onrendabele top (ORT) voor wind op land € 40/MWh. De financiële bijdrage van de NS komt hiermee op 11% van de totale onrendabele top. Op basis van economische allocatie mag de NS (bij prijzen zoals hier gehanteerd) dus ruim 10% van de CO₂-reductie 'claimen'.

Hierbij moeten we wel de kanttekening maken dat, indien je 'economische allocatie' toe zou passen op CO₂-reductie, je dat ook bij de inkoop van groene stroom zou moeten doen. In dat geval is het niet legitiem om te claimen dat de NS volledig op groene stroom rijdt. Uit Figuur 20 blijkt immers dat het grootste deel van de CO₂-reductie door windenergie gefinancierd wordt vanuit de SDE+ regeling.

Allocatie op basis van eigendom van GvO's

Een tweede veelgebruikte methode is de allocatie op basis van eigendom van GvO's. Deze methode is in lijn met de methode zoals geschetst bij de monitoringsprotocollen. Degene die de GvO's koopt en afboekt mag de CO₂-reductie claimen. Op het moment dat er GvO's op de markt komen doordat de NS er minder afneemt vanwege de energiebesparing is de CO₂-reductie voor partij die deze GvO's koopt.

6.4 Conclusie

Aangezien de NS op dit moment gebruik maakt van de methode 'allocatie op basis van eigendom van GvO's' is het consequent ook voor de CO₂-reductie deze methode aan te houden. Dit betekent dus dat de CO₂-reductie toekomt aan de partij die de GvO's koopt die vrijkomen door de elektriciteitsbesparing die de NS realiseert. Mocht gekozen worden voor de methode van economische allocatie, en je hanteert die methode consequent, dan komt een deel van de CO₂-reductie de NS toe. Het percentage dat dan geclaimd kan worden is ruim 10%.

Bij 'allocatie op basis van eigendom van GvO's' kan er geen CO₂-reductie toegerekend worden, en bij 'economische allocatie' vervalt de claim dat de NS volledig op groene stroom rijdt. Het is daarom voor de NS het zuiverst om de focus te leggen op de 'energiebesparing' die de maatregelen opleveren. Qua CO₂-reductie kan men het beste de nadruk leggen op de hoeveelheid CO₂, die daardoor bespaard wordt in Nederland. Hiermee laat je feitelijk zien wat de situatie is, en vermijd je inconsequenties of moeilijk uitlegbare situaties rondom CO₂-reductie. De redeneerlijn wordt dan dat er zoveel mogelijk energie bespaard wordt, en dat voor het gedeelte dat overblijft groene stroom ingekocht wordt.



7 Conclusies

In dit rapport zijn verschillende energiebesparingsmaatregelen inclusief 3 kV met elkaar te vergelijken. Daarbij is bepaald hoeveel CO₂-reductie de maatregelen opleveren en wat de kosteneffectiviteit is van de verschillende maatregelen. Alle maatregelen (met uitzondering van 3 kV) kunnen geïmplementeerd worden onder de huidige 1,5 kV tractie energievoorziening.

De berekeningen zijn gebaseerd op input van verscheidene experts van de NS en ProRail. Veel van de expertschattingen zijn met flinke onzekerheid omgeven. Daarom is in de effectschattingen een bandbreedte aangehouden. De lage effectschatting is berekend op basis van een lage inschatting voor de kosten en een hoge inschatting voor de energiebesparingseffecten. In de hoge schatting is dit precies andersom. Daarnaast zijn de berekende waarden vergeleken met de geactualiseerde resultaten uit de vorige CE Delft-studie (CE Delft, 2016), die ook maatregelen omvatten buiten de spoorsector.

7.1 Vergelijking effectiviteit en kosteneffectiviteit 3 kV met andere spoormaatregelen

Dit rapport laat zien dat het implementeren van 3 kV van alle onderzochte maatregelen verreweg het grootste potentieel heeft om energie te besparen en CO₂ te reduceren. Van de overige maatregelen kunnen het koppelen van de bovenleiding, het sterk inzetten op zuinig rijden en het verhogen van het rendement van de tractie-installatie in de trein een ook behoorlijke hoeveelheid energie besparen. De overige maatregelen besparen in vergelijking maar een klein aandeel van het totale elektriciteitsverbruik van de NS. Het vergroenen van het regionale spoor, door middel van elektrificatie of overstappen op waterstof of bio-LNG, kan nog eens 31 kiloton CO₂ reduceren.

Er zijn drie maatregelen met een negatieve kosteneffectiviteit: het koppelen van de bovenleiding, rendementsverbetering van de tractie-installatie in de trein en sterk inzetten op zuinig rijden. Een negatieve kosteneffectiviteit betekent dat deze maatregelen (naast de gereduceerde CO₂) ook netto baten voor de maatschappij opleveren. Het gaat hier bovendien om de maatregelen met een relatief groot CO₂-reductiepotentieel. 3 kV heeft een kosteneffectiviteit van 109 €/ton CO₂. Dat is relatief laag in vergelijking met andere maatregelen.

7.2 Actualisatie analyse 2016

De studie 'Benchmark 3 kV tractievoeding', uitgevoerd door CE Delft in 2016, is in deze studie geüpdatet. De meeste gegevens waarop de toenmalige berekeningen gebaseerd zijn bleken nog geldig, waardoor alleen een aantal prijzen (o.a. energieprijzen, brandstofprijzen en CO₂-prijzen) bijgewerkt moesten worden. Deze aanpassingen leiden tot kleine verschillen ten opzichte van de vorige studie. Qua CO₂-kosteneffectiviteit heeft alleen het strenger handhaven van de Wet milieubeheer een negatieve kosteneffectiviteit (netto baten voor de maatschappij en CO₂-reductie). De kosteneffectiviteit van de andere maatregelen die zijn bekeken variëren van ongeveer € 20 (bijstook biomassa) tot € 280 (2 miljoen elektrische auto's in 2030) per gereduceerde ton CO₂.

7.3 Bepalen bijdrage 3 kV aan CO₂-doelstellingen

Het implementeren van 3 kV tractievoeding is verantwoordelijk voor een jaarlijkse besparing van ongeveer 0,06% van de totale CO₂-uitstoot van Nederland in 2030. De maatregel levert dus een (zeer) beperkte bijdrage aan de CO₂-reductiedoelstellingen. Hierbij moet wel worden bedacht dat de spoorsector al een relatief schone sector is die zuinig met energie omgaat.

7.4 Bepalen CO₂-reductie aan spoor

In Hoofdstuk 6 zijn twee verschillende methodes om CO₂-reductie toe te rekenen uitgelegd. De belangrijkste conclusie hieruit is dat de CO₂-reductie Nederland als geheel ten goede komt. De CO₂-reductie kan strikt genomen niet aan de spoorsector zelf worden toegerekend. Wel kan de NS de behaalde energiebesparing claimen.

7.5 Suggesties voor verder onderzoek

De maatregelen die in deze studie onderzocht zijn, zijn bij lange na niet de volledige lijst met energiebesparingsmaatregelen voor de spoorsector. Tijdens ons onderzoek zijn we op een aantal andere maatregelen gestuit die ook energiebesparingspotentieel hebben en waarvan het interessant zou zijn om de kosteneffectiviteit uit te rekenen. Een aantal suggesties:

- het verminderen van het gewicht van de trein (lightweighting), zodat de trein zuiniger wordt (verder rijden met minder stroom);
- het verlagen van het energieverlies in de gelijkrichter;
- het opheffen van snelheidsbeperkingen op bepaalde baanvakken;
- het verlagen van de luchtweerstand die de trein ervaart, bijvoorbeeld door middel van het aerodynamischer maken van treinen;
- energieopslag in de trein zelf, bijvoorbeeld in de vorm van batterijen.

In eventueel vervolgonderzoek zouden deze maatregelen kunnen worden meegenomen.

Literatuur

- Arcadis, 2016. *Onderzoek Batterij-Waterstofrein*, Amersfoort: Arcadis.
- CE Delft, 2015. *Kentallen voor grijze en 'niet-geormerkte stroom' inclusief upstream-emissies*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2016. *Benchmark 3 kV tractievoeding*, Delft: CE Delft.
- Cornic, D., 2010. Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation. *Electrical systems for aircraft, railway and ship propulsion*.
- ECN, 2016. *Nationale Energieverkenning 2016*, Petten: ECN.
- First Dutch, 2014. *Vergroening regionale spoorlijnen*, sl: sn
- Jonker, E., 2010. *Slim schakelen: Besparen en duurzaam ondernemen*, sl: KEMA.
- NS & ProRail, 2017. *Een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse van een verbeterde tractie energievoorziening - concept versie 11 aug 2017*, Utrecht: NS & ProRail.
- NS en ProRail, 2014. *Beter & Meer: Voorstel voor de operationele uitwerking van de Lange Termijn Spooragenda*, Utrecht: sn
- NS, 2017. *NS Jaarverslag 2016*, Utrecht: NS Groep NV.
- PBL, 2015. *WLO: Cahier Mobiliteit*, Den Haag: PBL.
- ProRail & NS, 2015. *Een maatschappelijke kosten-baten analyse van de een verbeterde tractie-energievoorziening-versie 6*, Utrecht: Prorail & NS.
- ProRail, 2015. *Memo: Sectorbreed CO2 emissie reductieprogramma - (eis 5.D.3) – 3 kV*. sl:ProRail.
- SER, 2015. *Actie-agenda duurzame brandstoffen*, sl: sn
- Ten Harve, G. F., 2012. *Duurzame Tractie Energievoorziening: Ontwikkeling van een model om CO2-reductie maatregelen te beoordelen*, Delft: TU Delft.
- Thielens, D. & Ploeg, T., 2009. *Mogelijkheden reductie energieverliezen in 1500V DC systeem door bijplaatsen onderstations*, sl: KEMA.
- Zoeteman, A., Ten Harve, F. & Ploeg, T., 2014. Analysing the business case for introducing a 3 kV traction power supply in Dutch railways. *WIT Transactions on The Built Environment*, pp. 745-755.



A Lijst met geraadpleegde deskundigen

A.1 NS

- Ralph Luijt
- Patrick van Beek
- Gerben Scheepmaker
- Dirk Uittenbogaart

A.2 ProRail

- Fedor ten Harve
- Marcel Walraven

A.3 Spoorgloren

- Jan Hoogenraad

B Berekeningen volgens CO₂-factor NS

B.1 Inleiding

In deze bijlage worden de hoeveelheid CO₂-besparing en CO₂-kosteneffectiviteit voor alle maatregelen herberekend voor 2030 volgens de methode die de NS en ProRail is hun meest recente MKBA toepassen.

Onderliggend aan deze methodologie is de aanname dat het aannemelijk is dat de gascentrales de centrales zijn die minder gaan draaien als er minder vraag naar elektriciteit is. Daarmee wordt de elektriciteitsproductie uit gascentrales uitgespaard als er elektriciteit bespaard wordt. Op korte termijn is dit een plausibele aanname. Om 2030 ook onder de korte termijn te scharen, conform de NS MKBA, is, onzes inziens, een suboptimale methode om de CO₂-uitstoot van elektriciteitsbesparing te berekenen. Om consistentie met de meest recente MKBA te behouden zijn onze berekeningen ook doorgevoerd conform deze methode. De resultaten daarvan worden in dit hoofdstuk gepresenteerd, voor het zichtjaar 2030.

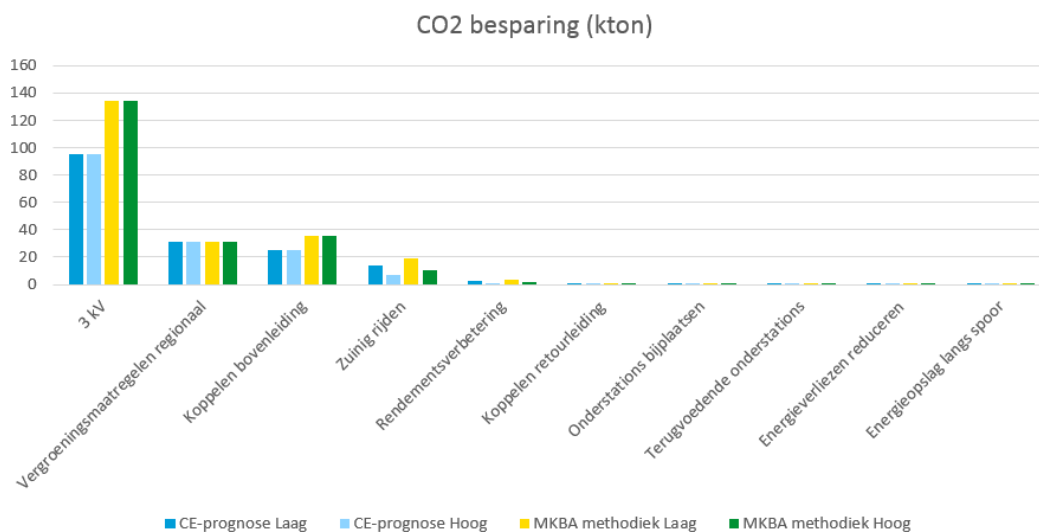
B.2 CO₂-reductie

In deze paragraaf worden de resultaten van de CO₂-besparing van de verschillende maatregelen gepresenteerd voor het jaar 2030. Aangezien de methodiek tussen de CE Delft-prognose en de MKBA alleen verschilt op het gebied van energiebesparing omrekenen naar CO₂-besparing, is het bijwerken van de elektriciteitsbesparing van de verschillende maatregelen niet nodig.

In de MKBA-methodiek gaat men ervan uit dat elektriciteitsbesparing in 2030 meer CO₂-besparing oplevert dan volgens CE Delft-prognoses. Daardoor zal de elektriciteitsbesparing van een bepaalde maatregel resulteren in een grotere CO₂-besparing als gerekend wordt met de methodiek conform de MKBA. Dit is duidelijk te zien in Figuur 21. De 3 kV-maatregel bespaart in 2030 jaarlijks bijna 135 kiloton, terwijl onder de andere methode 'slechts' 95 kiloton wordt bespaard. Dezelfde trend is zichtbaar voor alle andere maatregelen.

In Figuur 21 zijn twee maatregelen, 'Vergroenen van het regionale spoor' en 'Extra tractiemotoren in de SLT plaatsen' niet meegenomen. De grootte van de CO₂-besparing werd in beide gevallen niet beïnvloed door de CO₂-methodiek. In het eerste geval doordat het berekende effect van de maatregel in een bronrapport al was uitgedrukt in termen van CO₂. In het tweede geval omdat de extra tractiemotoren als maatregel überhaupt geen elektriciteit bespaarde.

Figuur 21 - 2030: CO₂-besparing in kiloton (methodiek MKBA)

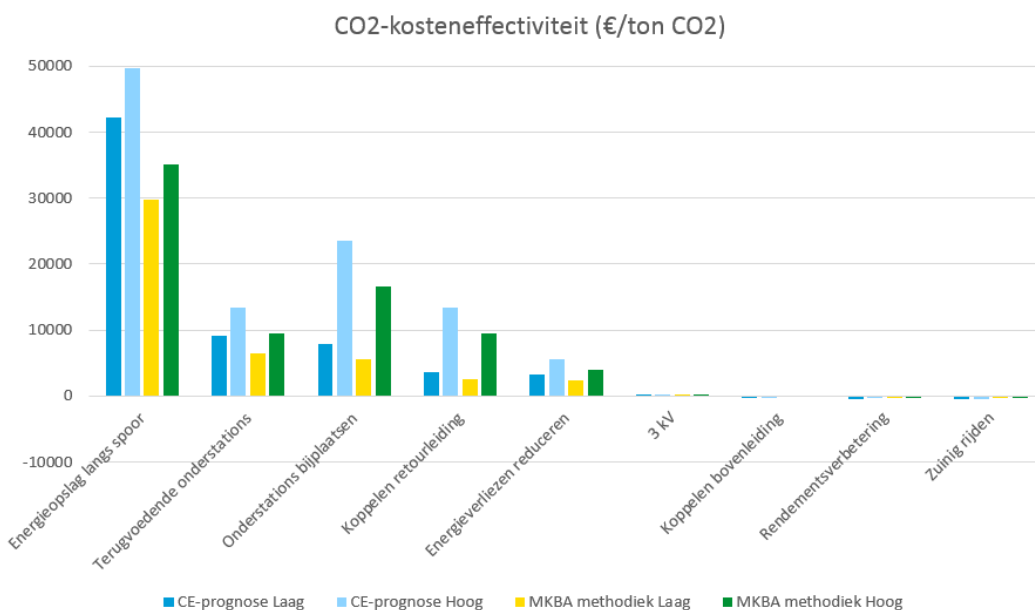


B.3 CO₂-kosteneffectiviteit

Doordat de gekozen CO₂-methodiek bepalend is voor de hoeveelheid CO₂-besparing, verandert daardoor ook de CO₂-kosteneffectiviteit. Figuur 22 illustreert de verschillen in CO₂-kosteneffectiviteit afhankelijk van de berekeningsmethode van de CO₂-intensiteit van de elektriciteitsproductie.

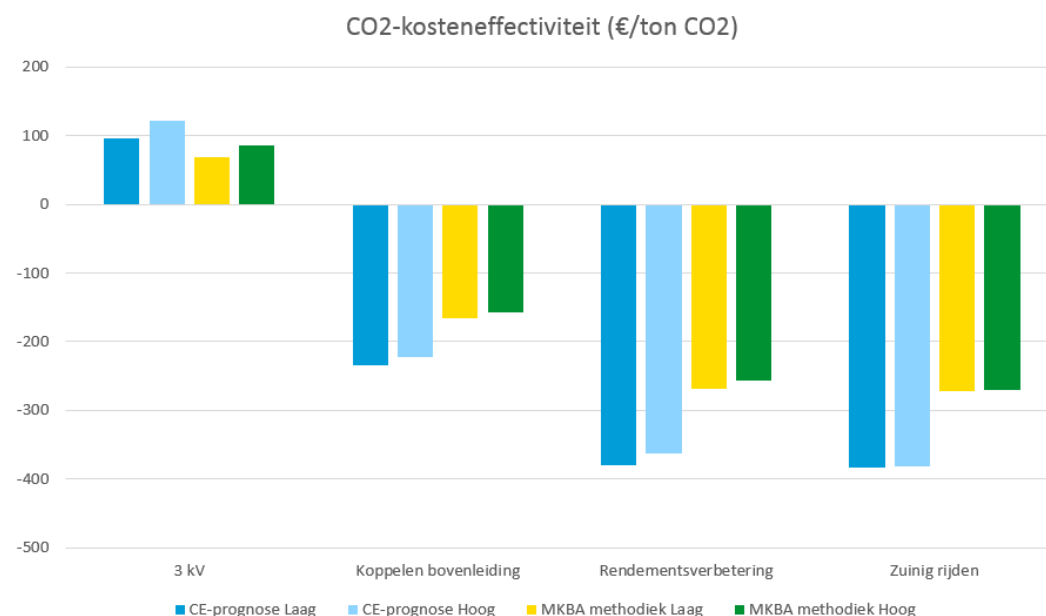
In vergelijking met Figuur 13 zijn de waarden met een positieve CO₂-kosteneffectiviteit lager geworden. Tegelijkertijd zijn waarden die een negatieve CO₂-kosteneffectiviteit hadden minder negatief geworden. Dit is het gevolg van dezelfde netto kosten die gedeeld moeten worden door een groter getal (hoeveelheid CO₂-reductie).

Figuur 22 - 2030: CO₂-kosteneffectiviteit (methodiek MKBA)



In Figuur 23 is dichter ingezoomd op een selectie aan maatregelen. De maatregelen met negatieve kosteneffectiviteit leveren naast de CO₂-reductie ook netto baten op. 3 kV heeft in deze berekeningen een lagere kosteneffectiviteit. Het reduceren van een ton CO₂ door middel van de 3 kV-maatregel kost nu ongeveer € 69-86 in plaats van € 97-121.

Figuur 23 - 2030: CO₂-kosteneffectiviteit (selectie maatregelen)



B.4 Aandeel CO₂-reductie in nationale uitstoot

Doordat de maatregelen gemiddeld meer CO₂ reduceren conform deze methodiek dan in Hoofdstuk 4, verandert ook het aandeel van de CO₂-reductie van de maatregelen ten opzichte van de totale uitstoot van de verkeer en vervoerssector, en Nederland als geheel. De resultaten worden gepresenteerd in Tabel 15.

Tabel 15 - Besparingspotentieel van een selectie maatregelen in 2030

	% van totale CO ₂ -uitstoot Nederland
3 kV	0,080
Koppelen bovenleiding	0,021
Zuinig rijden	0,009

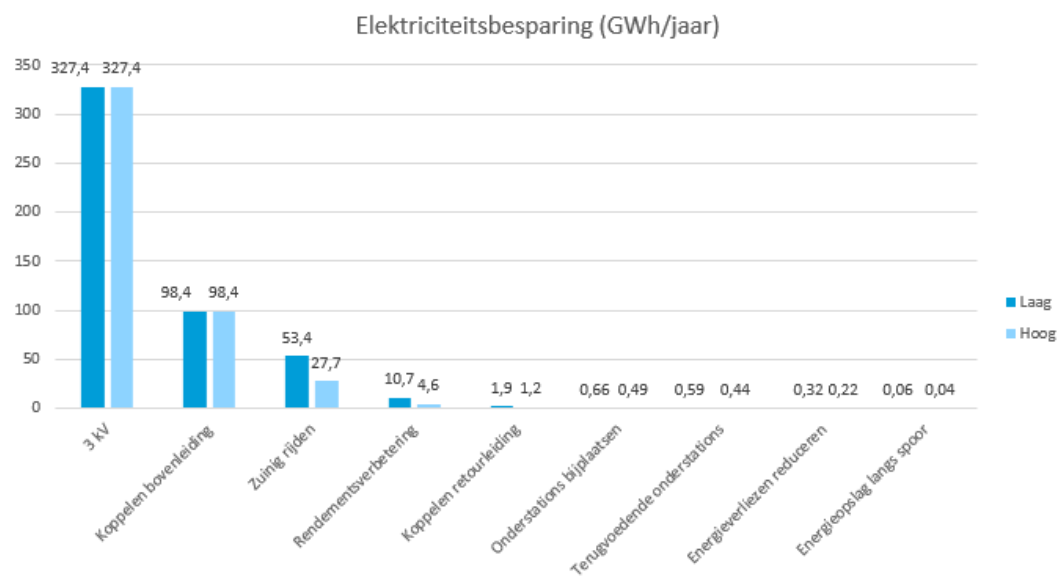
3 kV kan nu jaarlijks ongeveer 0,08% van de totale CO₂-uitstoot van de Nederlandse economie in 2030 besparen. In het algemeen blijven de getallen echter relatief klein. Dit is grotendeels te wijten aan het feit dat de spoorsector al een zeer zuinige sector is.

C Resultaten voor 2050

C.1 Energiebesparingspotentieel in 2050

Figuur 24 illustreert het elektriciteitsbesparingspotentieel van de verschillende maatregelen in 2050.

Figuur 24 - 2050: Elektriciteitsbesparingspotentieel

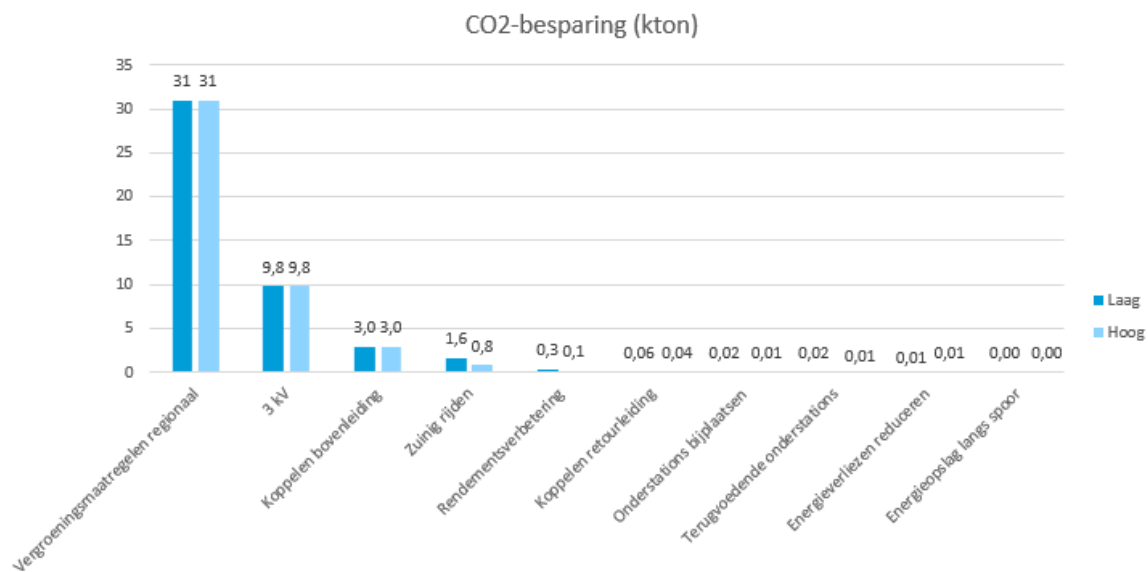


C.2 CO₂-besparingspotentieel in 2050

Figuur 25 illustreert het CO₂-besparingspotentieel van de verschillende maatregelen in 2050.

Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van de CE Delft-prognose betreffende de gemiddelde CO₂-intensiteit van elektriciteitsopwekking.

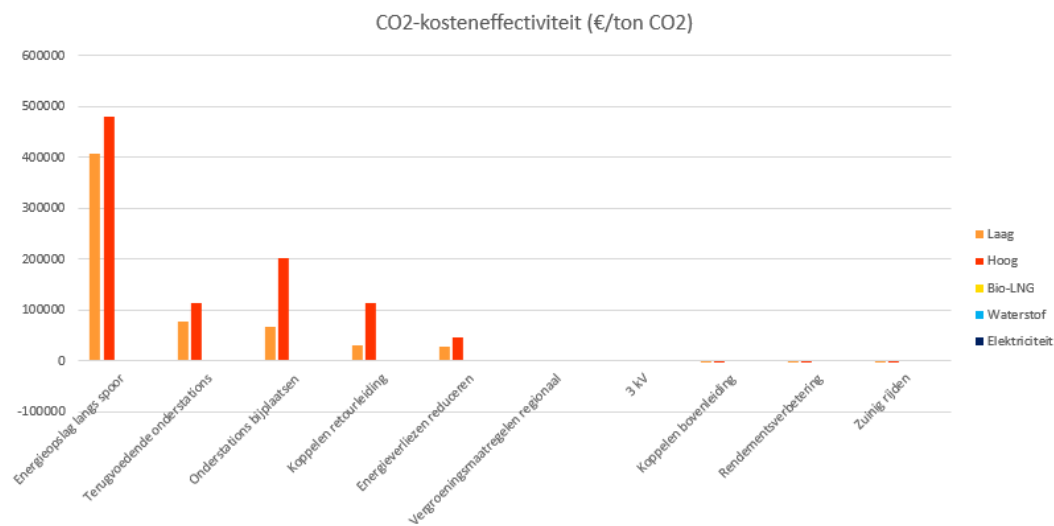
Figuur 25 - 2050: CO₂-besparingspotentieel



C.3 CO₂-kosteneffectiviteit in 2050

Figuur 26 illustreert de CO₂-kosteneffectiviteit voor de maatregelen in 2050. In Figuur 27 is verder ingezoomd op het rechter gedeelte van Figuur 26.

Figuur 26 - 2050: CO₂-kosteneffectiviteit



Figuur 27 - 2050: CO₂-kosteneffectiviteit (selectie maatregelen)

