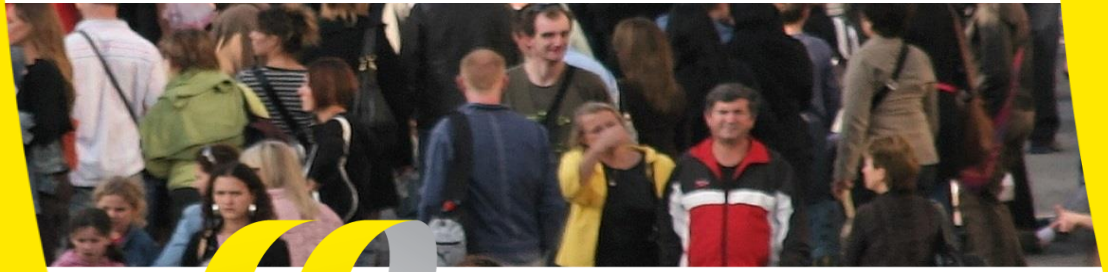
Benchmark 3 kV tractievoeding

Een vergelijking van (kosten)effectiviteit van 3 kV tractievoeding en andere energiemaatregelen



CE Delft

Inhoudsopgave

1 Inleiding

2 Verhogen tractiespanning naar 3 kV

3 Vergelijking 3 kV met andere maatregelen

4 Conclusies

Bijlage A Verschillen met MKBA van een verbeterde tractie-energievoorziening

Bijlage B Achtergrondinformatie infographics Hoofdstuk 2

Bijlage C Methodologie berekening kosten-effectiviteit

Bijlage D Gehanteerde kentallen

Bijlage E Uitwerking individuele maatregelen

Achtergrond

Het verhogen van de elektrische spanning op de bovenleiding van het spoor van 1,5 naar 3,0 kV kan bijdragen aan een intensiever en duurzamer spoor.

In de operationele uitwerking van de Lange Termijn Spooragenda (LTSA) geven NS en ProRail aan dat het verhogen van de netspanning naar 3 kV de voorkeursoptie is om hoogfrequente lijnvoeringsconcepten mogelijk te maken (NS en ProRail, 2014). Bovendien draagt deze optie bij aan een duurzamer spoor, doordat de energieverliezen in de bovenleiding verlaagd kunnen worden en de efficiëntie van het hergebruik van teruggewonnen remenergie kan worden verhoogd.

De kosten en baten van de overschakeling op 3 kV zijn door ProRail en NS in kaart gebracht met behulp van een Maatschappelijke KostenBaten-Analyse (ProRail & NS, lopend). In aanvulling hierop biedt deze rapportage een overzicht hoe deze kosten en baten zich verhouden tot andere energie-besparings- en hernieuwbare energiemaatregelen.

Andere opties voor verbeteren tractie-energievoorziening

Er zijn meerdere opties om de tractie-energievoorziening op het spoor te verhogen. Een migratie naar wisselspanning (25 kV of 15 kV) is mogelijk, maar zeer duur (> € 10 miljard). Ook kan het huidige 1.500 V (gelijk-spanning) systeem energie-efficiënter worden gemaakt, maar uit de MKBA blijkt dat deze optie maatschappelijk minder rendabel is dan een transitie naar 3 kV.

Doelstelling onderzoek

Het doel van de studie is om de (kosten)effectiviteit van de invoering van 3 kV te benchmarken aan andere energiebesparings- en hernieuwbare energiemaatregelen.

Deze benchmark dient inzicht te bieden in hoe de overstap naar 3 kV zich qua milieu/energiewinst verhoudt tot andere maatregelen. Daarbij richten we ons op een vergelijking met mogelijke energiemaatregelen die in 2030 kunnen bijdragen aan energiebesparing en CO_2-reductie in de verschillende economische sectoren. Het gaat hierbij om een breed scala aan maatregelen, variërend van investeringen in windmolens tot het verhogen van de bijmenging van biobrandstoffen.

Voor de benchmark hanteren we de volgende indicatoren:
- effectiviteit: reductie in CO_2-emissies (in Mton);
- kosteneffectiviteit: euro's per ton vermeden CO_2 (€/ton).

In aanvulling hierop maken we bij de energiebesparingsmaatregelen ook een vergelijking van de bespaarde energie (GJ).

Additionaliteit CO_2-reductie invoering 3 kV

De NS heeft de doelstelling om vanaf 2018 alle elektrische treinen op hernieuwbare elektriciteit (uit wind) te laten rijden. Hierdoor leidt de energiebesparing die wordt behaald door de invoering van 3 kV niet direct tot CO_2-besparing. Echter, 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 ingezet hoeft te worden. De hiermee gepaard gaande CO_2-reductie kan gezien worden als de additionele CO_2-reductie van 3 kV.

Afbakening van het onderzoek

In overleg met ProRail is de afbakening van deze benchmark studie opgesteld.

Daarbij hanteren we de volgende uitgangspunten:

- *Afbakening CO_2-emissies:* we bepalen de totale CO_2-reductie van maatregelen (in binnen- en buitenland).
- *Finale energiebesparing:* de energiebesparing tijdens de consumptie wordt in kaart gebracht,
- *Nationale kosten*: conform de milieukostenmethodiek (VROM, 1994; 1998), beschouwen we in deze studie de nationale kosten, d.w.z. alle directe kosten en baten van maatregelen vanuit een maatschappelijk perspectief. Zie Bijlage C voor meer informatie.
- *Basisjaar*: 2030. We brengen de jaarlijkse emissiereducties en kosten voor 2030 in kaart.
- Prijsniveau: 2015. Alle kosten worden uitgedrukt in euro's voor het prijsniveau in 2015.
- *Discontovoet*: 4% (cf. milieukostenmethodiek).
- *Energieprijzen:* we hanteren de energieprijzen uit de NEV 2015. Zie Bijlage D voor een overzicht van deze prijzen.
- *Onzekerheden*: de inschatting van de effectiviteit en met name de kosteneffectiviteit van de verschillende maatregelen is omgeven door grote onzekerheden (o.a. door gehanteerde energieprijzen en onzekere toekomstige technische kosten). Het gebruik van andere aannames kan bijv. leiden tot kosteneffectiviteit cijfers die enkele tientallen tot, bij sommige maatregelen zelfs honderd euro's hoger/lager kunnen uitvallen. De schattingen hebben naar verwachting wel de juiste ordegrootte en vormen daarmee een goede basis voor het benchmarken van 3 KV. Het gebruik van de resultaten van individuele maatregelen kent echter grote onzekerheden.

Rol van 3 kV in spoor- en energiedoelstellingen

Een transitie naar 3 kV levert een belangrijke bijdrage aan het realiseren van de lange termijn spoordoelstellingen.

De doelstellingen voor het spoorvervoer zijn vastgelegd in de Lange Termijn Spooragenda. De bijdrage van 3 kV hieraan zijn weergegeven in Tabel 1. Daarnaast kan 3 kV ook een bijdrage leveren aan het realiseren van de CO_2-doelstellingen voor de mobiliteitssector in het SER Energieakkoord: reductie naar 25 Mton in 2030 (SER, 2013). In de actieplannen, die in het uitvoeringsprogramma van het Energieakkoord voor de mobiliteitssector(de Brandstoffenvisie) worden ontwikkeld, wordt 3 kV dan ook meegenomen als potentiële maatregel.

Tabel 1 Bijdrage 3 kV aan de doelen in de Lange Termijn Spooragenda

LTSA-doelstelling	Bijdrage 3 kV tractiespanning
Borgen leidende positie trein als duurzaam transportmiddel	– Energiebesparing: verhoogde efficiëntie terugwinning remenergie. – Energiebesparing: minder netverliezen.
Verbeteren 'deur tot deur' reistijd	– Rijtijdwinsten; per reis, maar ook doordat 3 kV een bijdrage levert aan realisatie hoogfrequent spoorvervoer.
Verbeteren betrouwbaarheid	– Door verhoging omloopsnelheid en bijdrage aan realisatie hoogfrequent spoorvervoer neemt de robuustheid/toekomstvastheid m.b.t. de groei van het spoorvervoer toe.
Effectief en efficiënt	– Bijdrage aan realisatie groei vervoersomvang. – Door rijtijdwinsten is minder materieel en personeel nodig.

Bron: ProRail & NS (lopend).

CO_2 en energiebesparingseffecten 3 kV

Het verhogen van de netspanning naar 3 kV leidt jaarlijks tot 1,2 PJ energie-besparing en 134 kton CO_2-reductie.

Doordat bij 3 kV de efficiëntie van het terugwinnen van remenergie kan worden verhoogd en de netverliezen kunnen worden verminderd, kan het energiegebruik met 19,5% worden teruggebracht (Arcadis, 2013). Uitgaande van een energie-verbruik van 6,1 PJ van elektrische treinen in 2030 (zonder 3 kV), leidt dit tot een energiebesparing van 1,2 PJ in 2030.

Tabel 2 Energiebesparing 3 kV in 2030

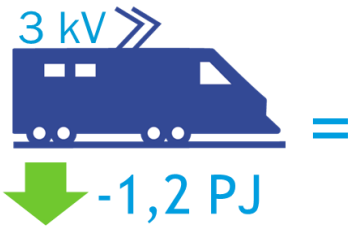
	Energie-verbruik referentie		Relatieve energiebesparing	Energie-besparing 3 kV
	GWh	PJ	%	PJ
Elektrisch spoorvervoer	1.680	6,1	19,5	1,2

Uitgaande van een (marginale) CO_2-emissiefactor van 0,41 kg/kWh in 2030 (zie Bijlage B), leidt deze besparing op het energieverbruik tot een (indirecte) CO_2-reductie van 134 kton.

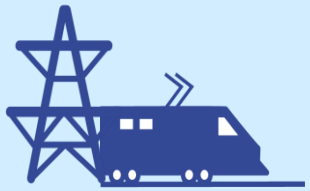
Indirecte i.p.v. directe CO_2-reductie

Aangezien de NS in 2030 volledig gebruik wil maken van hernieuwbare energie leidt 3 kV niet tot directe CO_2-reductie. Echter, zoals aangegeven op pagina 4, is er wel sprake van indirecte CO_2-reductie, doordat er capaciteit aan hernieuwbare energie vrijkomt, die in andere sectoren kan worden ingezet. In de door ProRail en NS uitgevoerde MKBA (ProRail & NS, lopend) wordt enkel rekening gehouden met de directe CO_2-reductie, waardoor de CO_2-reductie van 3 kV daar lager wordt ingeschat. Voor een volledige beschrijving van de verschillen tussen de door ProRail uitgevoerde MKBA en deze studie verwijzen we naar Bijlage A.

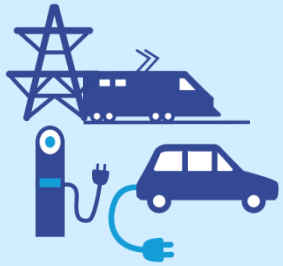
Energiebesparing via afname elektriciteitsverbruik 3 kV in perspectief



=



±20% van het totale elektriciteitsverbruik van het **spoorvervoer** in 2030 (o.b.v. ProRail en NS, lopend)



±10% van het totale elektriciteitsverbruik in de **verkeer- en vervoerssector** in 2030 (o.b.v. ECN/PBL, 2015)

Elektriciteitsverbruik van 142.000 **huishoudens** in 2030 (o.b.v. ECN/PBL, 2015)

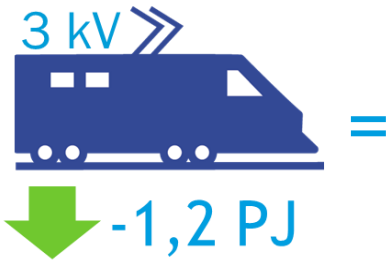
=

±50% van de huishoudens In de provincie Groningen (CBS)

Voor de achtergrondgegevens, zie Bijlage B.

Energiebesparing 3 kV t.o.v. energieverbruik verkeer

Naast een vergelijking van verschillende segmenten o.b.v. de energiebesparing door minder elektriciteitsverbruik(zie pagina 8), kan ook een vergelijking gemaakt worden van de energiebesparing door 3 kV met het totale energieverbruik (benzine, diesel, elektriciteit, etc.) in de verkeerssector. Daarbij dient opgemerkt te worden dat het aandeel van het energieverbruik door het elektrisch spoorvervoer in het totale energieverbruik in de verkeerssector beperkt is (ruim 1%), waardoor ook de energiebesparing door 3 kV als percentage van het totale energieverbruik in de verkeer en vervoerssector beperkt is.



=

= ±15%

van het totale energieverbruik van al (diesel + elektrisch) het **spoor- vervoer** (o.b.v. ProRail en NS, lopend; ECN/PBL, 2015)

= ±0,3%

van het totale energieverbruik in de **verkeer en vervoerssector** (o.b.v. ECN/PBL, 2015)

Voor de achtergrondgegevens, zie Bijlage B.

CO_2-kosteneffectiviteit 3 kV

Invoering van 3 kV heeft een geschatte kosteneffectiviteit van -€ 315 per ton CO_2. Deze maatregel leidt dus tot lagere kosten *en* CO_2-besparing.

De invoering van 3 kV leidt tot de volgende kosten en baten:

- *Ombouwkosten materieel*: ombouw naar bicourante treinen, die (ook) geschikt zijn voor 3 kV. ProRail & NS (lopend) schat deze investeringen in op € 381 miljoen, oftewel een jaarlijkse annuïtaire afschrijving van € 19,2 miljoen (afschrijftermijn: 40 jaar).
- *Ombouwkosten infrastructuur:* ombouw van voeding- en schakelstations naar 3 kV en lokale aanpassingen aan bovenleidingen. De benodigde investeringen bedragen 379 miljoen (ProRail & NS, lopend), wat leidt tot een jaarlijkse annuïtaire afschrijving van ca. € 19,1 miljoen.
- *Exploitatiekosten*; voor materieel en infrastructuur zijn die € 0,2 en € 0,5 miljoen per jaar (ProRail & NS, lopend).
- *Reistijdwinst personenvervoer:* de baten van sneller optrekkende treinen worden door ProRail & NS (lopend) ingeschat op € 38 miljoen per jaar. Reistijdwinsten voor regio- en goederentreinen zijn niet meegenomen.
- *Besparing elektriciteitskosten*: er wordt bespaard op de leveringsprijs en de transportkosten (zie Bijlage A). De jaarlijkse besparing in 2030 is ingeschat op € 33 miljoen.
- *Exploitatievoordelen;* door de reistijdwinsten kan de omloop van treinen toenemen, waardoor er bespaard kan worden op treinen en personeel. ProRail & NS (lopend) schat de jaarlijkse baten in op ca. € 10 miljoen.

Een overzicht van de jaarlijkse kosten en baten is weergegeven in Tabel 3 op Pagina 11.

CO_2-kosteneffectiviteit 3 kV

Uit Tabel 3 blijkt dat de baten van het overschakelen naar 3 kV (€ 81 miljoen per jaar) groter zijn dan de kosten (€ 39 miljoen per jaar). Met andere woorden: toepassing van 3 kV leidt tot maatschappelijke baten.

De jaarlijkse netto baten zorgen er ook voor dat 3 kV een zeer kosteneffectieve CO_2-maatregel is: -€ 315 per ton CO_2. Dit wil zeggen dat per bespaarde ton CO_2 de maatschappij ook netto baten van € 315 ontvangt. Een win-win-situatie dus.

Voor een nadere beschrijving van de verschillen tussen de bovenstaande kostenschattingen en de kostenschattingen in de door ProRail en NS uitgevoerde MKBA, zie Bijlage A.

Tabel 3 Jaarlijkse kosten en baten in 2030

Post	Jaarlijkse kosten/baten (mln. €)
Kosten	39
Ombouw materieel	19
Ombouw infrastructuur	19
Exploitatiekosten materieel en infrastructuur	1
Baten	81
Reistijdwinsten	38
Besparing elektriciteitskosten	33
Exploitatievoordelen	10
Netto baten	42

Overzicht maatregelen

De CO_2-reductie en CO_2-kosteneffectiviteit van 3 kV in 2030 is vergeleken met twaalf andere hernieuwbare energie en energie-besparingsmaatregelen. Deze maatregelen, die zijn weergegeven in Tabel 4, zijn gekozen in samenspraak met ProRail. Ze geven een goed beeld van de verschillende energiemaatregelen die getroffen kunnen worden in verschillende sectoren. Meer informatie over deze maatregelen, inclusief hun (kosten)effectiviteit, kan worden gevonden in Bijlage C.

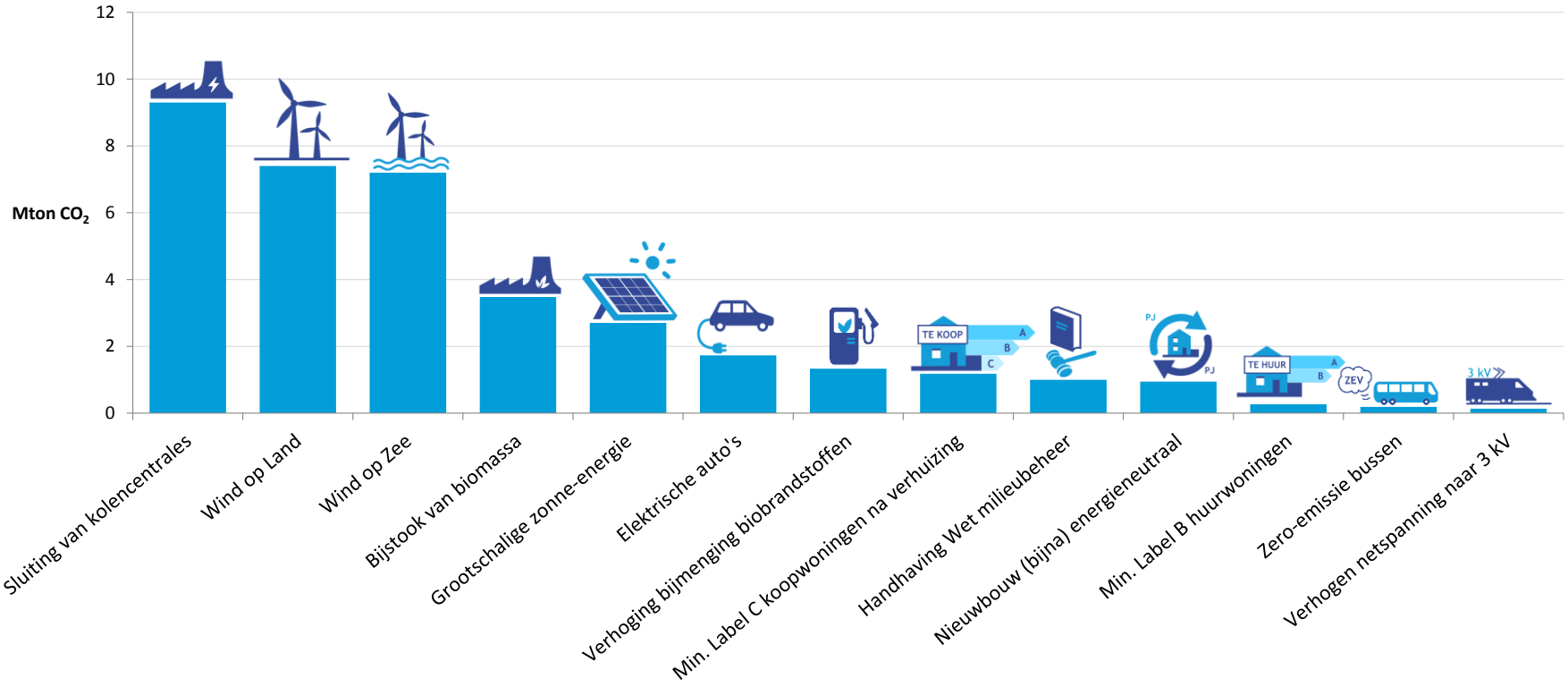
Tabel 4 Overzicht maatregelen

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 wordt verhoogd van 7 naar 12%
Minimaal label C koop-woningen 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 huur-woningen	In 2020 hebben alle sociale huurwoningen minimaal Label B

Maatregel	Korte omschrijving
Sluiting van kolencentrales	Alle kolencentrales in Nederland worden voor 2020 gesloten
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

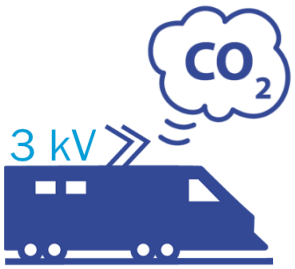
CO_2-reductie in 2030

De CO_2-reductie van 3 kV is minder dan bij de overige maatregelen, vooral omdat de spoorsector slechts een beperkt aandeel in de totale CO_2-emissies in Nederland heeft. Binnen deze sector is de effectiviteit van 3 kV echter aanzienlijk (-20% CO_2-emissies).



De achterliggende informatie kan worden gevonden in Bijlage E.

CO_2-reductie 3 kV in perspectief (1)



CO_2-reductie

=

±155.000 elektrische auto's = 1,6x het huidige aantal elektrische voertuigen (o.b.v. FET, 2016)

±3.500 zero-emissie bussen = 70% van alle OV-bussen (o.b.v. ING, 2012)

±16 windmolens op zee

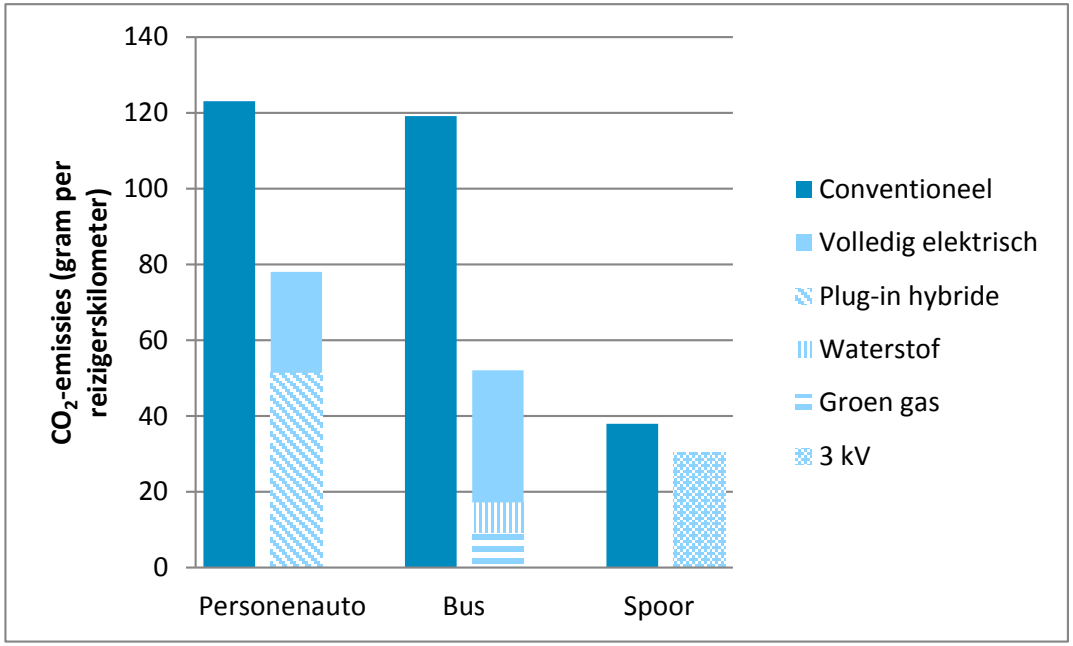
±40 windmolens op land

Voor de achtergrondgegevens, zie Bijlage E.

CO_2-reductie 3 kV in perspectief (2)

In vergelijking met andere vervoersmodaliteiten is spoorvervoer al CO_2-efficient.

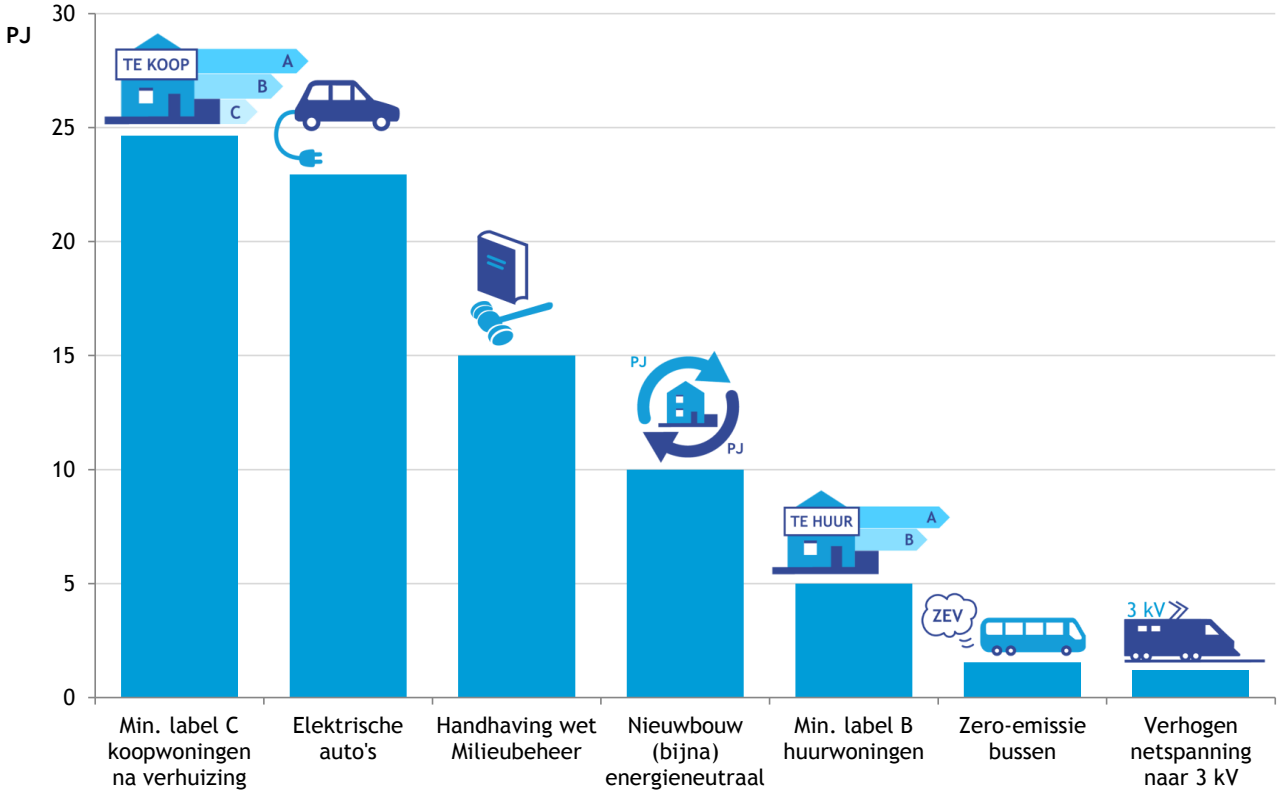
Dit is geïllustreerd in de figuur hiernaast, waar de CO_2-emissies per reizigerskilometer van een elektrische intercitytrein is vergeleken met een conventionele personenauto en OV-bus (donkerblauwe balkjes). Ook bij toepassing van de technische maatregelen zoals verondersteld in deze studie (zie Pagina 12), scoort de trein nog altijd beter dan de auto en bus (lichtblauwe balkjes).



Noot: Bij elektrische auto's gaat het om 50% volledig elektrische auto's en 50% plug-in hybrides.
Bij ZE-bussen gaat het om een combinatie van elektrische, waterstof en groengas-bussen.
De gehanteerde gemiddelde bezettingsgraden voor auto en bus zijn 1,4 en 9 personen.
Voor de trein is uitgegaan van een gemiddelde bezettingsgraad van 32%.
Bron: TNO et al., 2015; CE Delft, 2015.

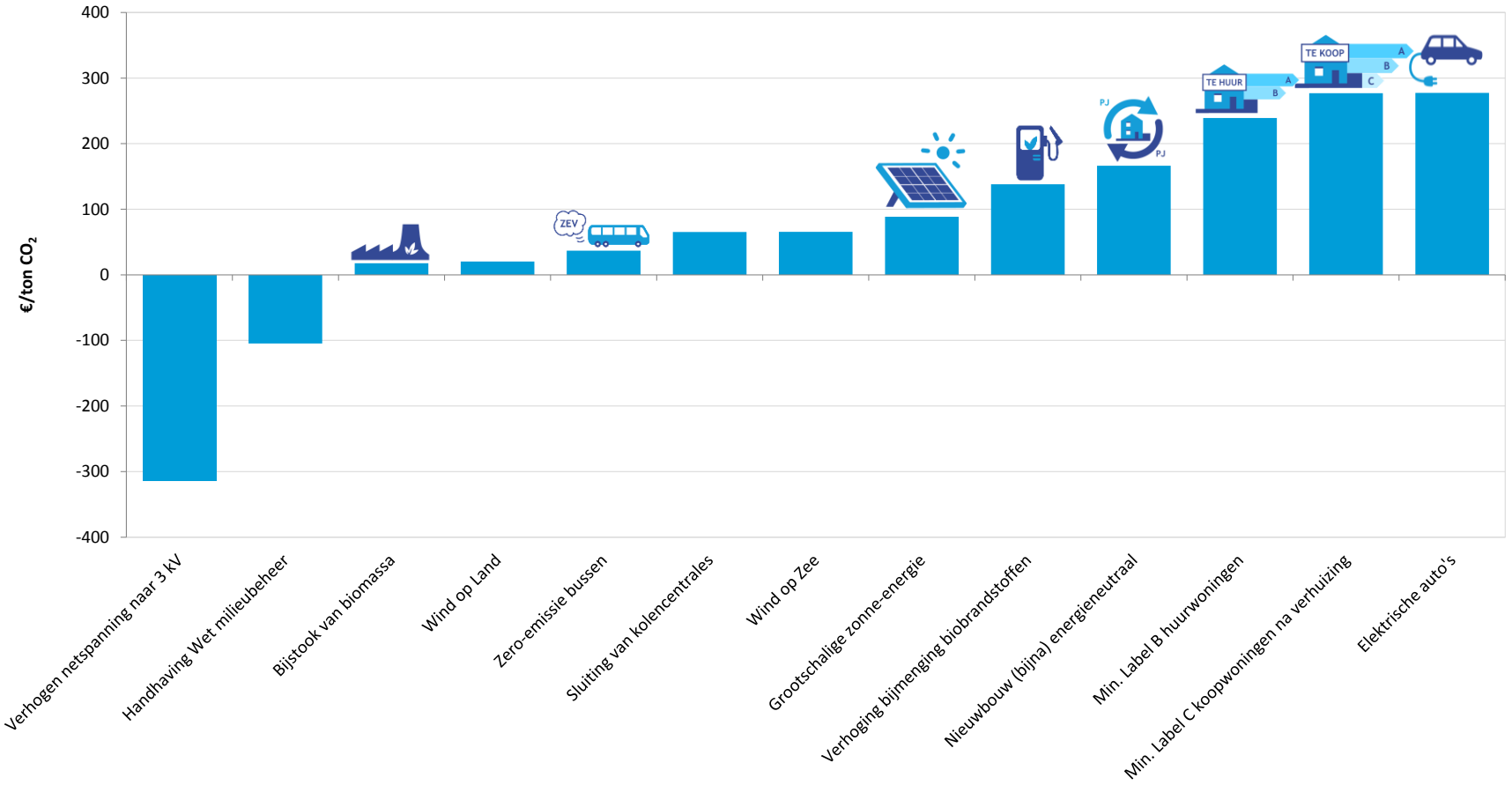
Energiebesparing in 2030

De energiebesparing die wordt gerealiseerd bij 3 kV is vergelijkbaar met een volledige overstap naar zero-emissie bussen. In vergelijking met sommige andere maatregelen zijn de effecten beperkt, wat het gevolg is van de relatief beperkte omvang van de spoorsector in het totale energieverbruik in Nederland. De effectiviteit van 3 kV binnen de spoorsector is echter significant (-20%). Bovendien geldt hier wederom, evenals bij CO_2-emissies, dat de efficiëntie van de spoorsector al relatief hoog is, waardoor verbeteringen lastiger realiseerbaar zijn.



De achterliggende informatie kan worden gevonden in Bijlage E.

CO_2-kosteneffectiviteit in 2030



De achterliggende informatie kan worden gevonden in Bijlage E.

Conclusies

Een transitie naar 3 kV is een zeer kosteneffectieve maatregel om de CO_2-uitstoot te verminderen.

De CO_2-kosteneffectiviteit van 3 kV wordt ingeschat op -€ 315 per ton CO_2, wat wil zeggen dat per bespaarde ton CO_2 de maatschappij netto baten van € 315 ontvangt (vooral in de vorm van reistijdbaten en besparingen op elektriciteits-kosten). Uit de benchmark studie blijkt ook dat 3 kV kosten-effectiever is dan alle twaalf onderzochte hernieuwbare energie en energiebesparingsmaatregelen.

De transitie naar 3 kV levert een CO_2-reductie op van 15% van de emissies van het spoorvervoer. Hiermee kan de reeds CO_2-efficiënte spoorsector nog verder vergroend worden. Onze analyses laten zien dat daarmee elektrisch spoorvervoer ook in 2030 CO_2-efficiënter kan blijven dan personenauto's en busvervoer.

De bijdrage aan de gewenste totale CO_2-reductie in Nederland is beperkt. Zo levert 3 kV een CO_2-reductie van 0,1 Mton in 2030, terwijl sluiting van de kolencentrales leidt tot een reductie van ruim 9 Mton. Echter, er moet rekening gehouden worden met het feit dat de spoorsector slechts een zeer beperkt aandeel heeft in de totale CO_2-emissies in Nederland, waardoor ook de bijdrage aan de totale CO_2-reductie vanuit deze sector beperkt zal zijn.

De inschatting van de (kosten)effectiviteit van de individuele maatregelen kent de nodige onzekerheden. Echter, de ordegrootte van de effecten is naar verwachting robuust, waardoor een betrouwbare benchmark van de (kosten)effectiviteit van 3 kV mogelijk is.

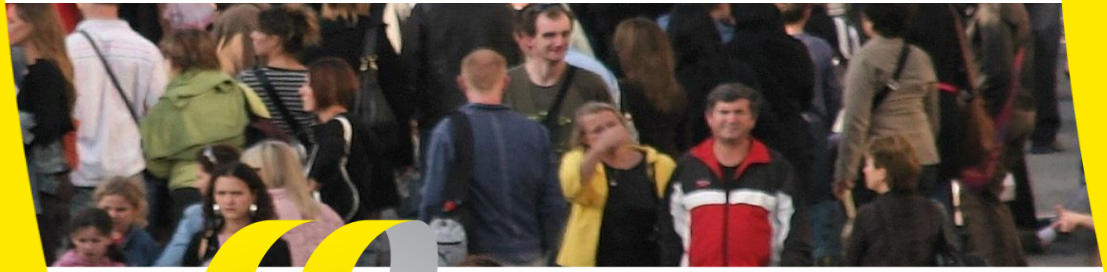
Referenties

- Arcadis (2013), *Onderzoek invoering 3 kV - Xandra simulaties,* Amersfoort
- CE Delft (2016), Alternatieven voor meestook biomassa in kolencentrales, Delft
- CE Delft (2015), *STREAM personenvervoer - versie 1.1*, Delft
- EC (2009), *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*, Brussels
- ECN en PBL (2016), *Kostenefficiëntie van beleids-maatregelen ter vermindering van broeikasgasemissies*, Petten/Den Haag
- ECN en PBL (2015), *Nationale Energieverkenning 2015*, Petten/Den Haag
- FET (2016), *http://nederlandelektrisch.nl/verkoopcijfers*, website geraadpleegd in juni 2016
- ING (2012), Tijd voor verdere professionalisering van OV-busvervoer, Amsterdam
- IPO (2015), *Visie Duurzaam Regionaal OV - Transitie naar zero emissie regionaal openbaar vervoer*
- Ministerie van Binnenlandse Zaken, Aedes, Bouwend Nederland, Energie-Nederland, NVB, Neprom, Uneto-VNI, Vastgoed Belang, Nederlandse Woonbond (2012), *Koepelconvenant Energiebesparing Gebouwde Omgeving*, Den Haag
- Ministerie van EZ, I&M en BZK (2011), *Elektrisch rijden in de versnelling - Plan van Aanpak 2011-2015*, Den Haag
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2014), *Een duurzame brandstofvisie met LEF*, 2014

Referenties

- NS en ProRail (2014), *Beter & Meer: voorstel voor de operationele uitwerking van de Lange Termijn Spooragenda, Utrecht, 2014*
- ProRail & NS(lopend), *Een maatschappelijke kosten-baten analyse van een verbeterde tractie-energievoorziening - versie 6 (2 december 2015)*, aangeboden aan het Ministerie van Infrastructuur en Milieu ter review, Utrecht
- SER (2013), *Energieakkoord voor duurzame groei*, Den Haag
- VROM (1994), *Methodiek Milieukosten*, Den Haag
- VROM (1998), *Kosten en baten in het milieubeleid: Definities en berekeningsmethodes*, Den Haag

Bijlagen



CE Delft

CO_2-reductie

In de MKBA (ProRail & NS, lopend) wordt de CO_2-reductie van 3 kV ingeschat op 75,4 kton per jaar, terwijl in deze studie wordt uitgegaan van 134 kton per jaar.

Er zijn twee belangrijke verschillen tussen de beide studies:

- *Indirecte CO_2-emissies*: in deze studie nemen we zowel de directe als indirecte CO_2-reducties van 3 kV mee (zie Pagina 7 voor een uitleg van indirecte reducties), terwijl in de MKBA enkel de directe reducties worden meegenomen. Dit leidt tot 50% lagere emissiereducties in de MKBA.
- *CO_2-emissiefactor:* in de MKBA wordt gerekend met de CO_2-emissiefactor van de Nederlandse Handelsmix grijze stroom (0,463 kg/kWh). In deze studie, daarentegen, rekenen we met de marginale CO_2-emissiefactor van elektriciteits-productie (0,41 kg/kWh), die is gebaseerd op de emissie-factor van gascentrales (zie Bijlage D voor een nadere uitleg van deze keuze).

Met name het meenemen van de indirecte CO_2-reducties leiden tot een hogere schatting van de CO_2-reducties van 3 kV in deze studie t.o.v. de MKBA. Dit wordt voor een beperkte mate gecompenseerd door de toepassing van een lagere CO_2-emissiefactor.

Kosten en baten

De wijze waarop de kosten en baten worden gepresenteerd en de inputwaarden die worden gebruikt verschillen in de MKBA t.o.v. deze studie.

Op de volgende punten verschilt de bepaling van de kosten en baten in de MKBA t.o.v. deze studie:

- *Projectkosten vs. jaarlijkse kosten*: in de MKBA worden de kosten en baten voor de gehele levensduur van het project bepaald (40 jaar). Dit is in lijn met de gebruikelijke methodiek voor een MKBA. In deze studie hebben we echter de jaarlijkse kosten in 2030 bepaald, zodat de kosten en baten van 3 kV eenvoudig te vergelijken zijn met de kosten en baten van andere maatregelen. Het gaat hierbij dus om een andere vorm van presenteren van de kosten en baten en niet om een andere methodiek van kostenschattingen.
- *Discontovoet*: deze studie hanteert een andere discontovoet dan de MKBA (4% i.p.v. 5.5%). Hierdoor zijn de berekeningen in lijn met de Milieukostenmethodiek (zie Bijlage C) en is er een optimale vergelijkbaarheid met de doorrekening van andere maatregelen mogelijk.
- *Elektriciteitsprijs:* de elektriciteitsprijs gehanteerd in deze studie is lager dan in de MKBA (bijv. voor 2030: € 19,4 per GJ vs. € 25,5 per GJ. De elektriciteitsprijs in deze studie is in lijn met de prijs die wordt gehanteerd in veel andere studies (o.a. ECN/PBL, 2015; 2016).

Energieverbruik verschillende sectoren

In Tabel 5 zijn de schattingen van het elektriciteits- en energieverbruik van verschillende sectoren in 2030 weergegeven. Deze schattingen zijn gebruikt bij het maken van de infographics in Hoofdstuk 2.

Om het elektriciteitsverbruik per huishouden te bepalen, is het totale elektriciteits-verbruik van huishoudens gedeeld door het geschatte aantal huishoudens in 2030 (8,55 miljoen; PBL en ECN, 2015).
Dit resulteert in een gemiddeld elektriciteits-verbruik in 2030 van 8,3 GJ per huishouden.

Tabel 5 Elektriciteits- en energieverbruik van verschillende sectoren in 2030

Sector	Energie/elektriciteitsverbruik	Bron
Elektriciteitsverbruik in 2030 (PJ)		
Spoorsector	6	ProRail (lopend)
Totale verkeer en vervoerssector	12	ECN en PBL (2015)
Huishoudens in Nederland	71	ECN en PBL (2015)
Energieverbruik in 2030 (PJ)		
Spoorsector	8	Elektriciteit: ProRail lopend Diesel: ECN en PBL (2015)
Totale verkeer en vervoerssector	452	ECN en PBL (2015)

Kostenschatting conform de Milieukostenmethodiek

De kosten en baten van de verschillende maatregelen zijn in deze studie ingeschat conform de Milieukostenmethodiek.

Kostenschattingen conform de Milieukostenmethodiek (VROM, 1994; 1998) brengen het saldo van directe kosten en baten vanuit een nationaal kostenperspectief in kaart. De volgende kosten zijn daarbij relevant:

- investeringskosten;
- beheer- en onderhoudskosten;
- baten van vermeden energiegebruik;
- kosten/baten van veranderingen in aan te kopen CO_2-emissierechten in het Europese emissiehandelssysteem.

Posten die geen onderdeel vormen van kostenschattingen conform de Milieukostenmethodiek zijn:

- indirecte kosten (bijv. kosten die volgen uit effecten op andere markten, zoals de arbeidsmarkt);
- externe kosten (bijv. luchtvervuilingskosten).

In deze studie hanteren we een nationaal perspectief, waarbij alle (directe) kosten en baten voor de BV Nederland worden meegenomen. Het gaat dus om het saldo van kosten en baten binnen Nederland, die samenhangen met de betreffende maatregel, ook als deze bij verschillende partijen terecht komen. Belastingen/subsidies zijn hierbij dus overdrachten en geen kosten.

Een alternatieve aanpak is het gebruik van het eindgebruikersperspectief, waarbij alle kosten en baten voor de eindgebruiker in beeld worden gebracht. Hierbij worden besparingen op belastingen wel meegenomen, zodat energiebesparingsmaatregelen vanuit dit perspectief veel kosteneffectiever uit de bus komen.

Bepaling CO_2-kosteneffectiviteit

De verschillende maatregelen worden in deze studie onder andere vergeleken op basis van hun CO_2-kosteneffectiviteit.

De CO_2-kosteneffectiviteit van maatregelen is gedefinieerd als de kosten die nodig zijn om een ton CO_2 te reduceren. Bijvoorbeeld, als een bepaalde maatregel die in totaal € 1.000 kost en leidt tot een CO_2-reductie van 100 ton, dan is de kosteneffectiviteit € 10 per ton CO_2.

De CO_2-kosteneffectiviteit is in deze studie bepaald op basis van jaarlijkse kosten, baten en CO_2-effecten. Daarbij is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$CO_2\text{-kosteneffectiviteit} = \frac{\Delta I^{Af} + \Delta O + \Delta E + \Delta C}{\text{jaarlijkse } CO_2 \text{ reductie}}$$

ΔI^{af} : Verandering in de jaarlijkse afschrijvingskosten op de investeringen
ΔO : Verandering in de onderhoud- en beheerkosten
ΔE : Verandering in de jaarlijkse energiekosten
ΔC : Verandering in de jaarlijkse kosten aankoop CO_2-emissierechten

Zoals duidelijk wordt uit de bovenstaande formule nemen we alle directe maatschappelijke kosten (zoals gedefinieerd op de vorige pagina) mee bij de bepaling van de kosteneffectiviteit.

CO_2-emissiefactoren

In de berekeningen is gebruik gemaakt van state-of-the-art CO_2-emissiefactoren.

De gehanteerde emissiefactoren zijn weergegeven in Tabel 7.

Een belangrijk aandachtspunt hierbij is dat hernieuwbare elektriciteit en energiebesparingsmaatregelen ertoe leiden dat er minder grijze elektriciteit hoeft te worden opgewekt. Daarbij wordt verondersteld dat de inzet van gascentrales wordt beperkt, aangezien die de hoogste marginale kosten hebben en relatief makkelijk afgeschakeld kunnen worden. De CO_2-reductie voor deze maatregelen wordt dan ook bepaald m.b.v. de CO_2-emissiefactor voor elektriciteit opgewekt in gascentrales.

Tabel 6 CO_2-emissiefactoren 2030

Energiedrager	Eenheid	CO_2-emissiefactor
Personenauto		
Benzine	g/vkm	172
Diesel	g/vkm	167
Elektrisch	g/vkm	74
Plug-in hybride	g/vkm	143
OV-bus		
Diesel	g/vkm	1.073
Elektrisch	g/vkm	475
Waterstof	g/vkm	419
Groen gas	g/vkm	494
Elektriciteit		
Elektriciteit opgewekt in gascentrale	kg/kWh	0,41
Brandstof elektriciteitsopwekking		
Kolen	kg/GJ	94

Energieprijzen

De energieprijzen voor 2030 zijn gebaseerd op de Nationale Energie-verkenning 2015 (PBL & ECN, 2015).

Ter illustratie zijn in Tabel 6 de gehanteerde energieprijzen voor 2030 weergegeven. In de analyses is rekening gehouden met de in de NEV verwachte ontwikkelingen in de energie-prijzen.

Aangezien we in deze studie uitgaan van een nationaal perspectief (zie Bijlage C), zijn alle energieprijzen excl. belastingen vastgesteld.

Voor de maatregel 3 kV zijn ook kentallen gebruikt voor de transportkosten van elektriciteit. Deze zijn gebaseerd op de netverklaring van ProRail en zijn gelijk aan € 31,9 per MWh.

Tabel 7 Energieprijzen 2030

Energiedrager	Prijs excl. belastingen (€/GJ)
Gas	10,4
Elektriciteit	19,4
Benzine	26,7
Diesel	27,3

Elektrische auto's

Nederland heeft ambitieuze doelstelling op het gebied van elektrische voertuigen: 2 miljoen in 2030.

De Nederlandse overheid heeft als doel om in 2020 200.000 elektrische voertuigen (EV's) op de weg te hebben, een aantal dat in 2025 uitgebreid zou moeten worden naar één miljoen (Ministerie van EZ, I&M en BZK, 2011). In de *Brandstofvisie met Lef* wordt voor 2030 de ambitie neergelegd van twee miljoen EV's. Daarbij gaat het voor 50% om volledig elektrische voertuigen en voor 50% om plug-in hybride voertuigen. In deze studie gaan we ervan uit dat al deze elektrische voertuigen personenauto's zijn.

CO_2-reductie en energiebesparing

De 2030 doelstelling voor EV's leidt tot een CO_2-reductie van 1.7 Mton en een energiebesparing van 23 PJ gerealiseerd. De resultaten per auto zijn eveneens weergegeven in Tabel 9.

Tabel 8 CO_2-reductie en energiebesparing elektrische auto's in 2030

	CO_2-reductie 2030	Energiebesparing 2030
Totaal effect (Mton/PJ)	1,7	23
Gemiddeld per auto (ton/MJ)	0,87	11.472

De gehanteerde kentallen in de berekeningen staan in Bijlage D. Verder is ervan uitgegaan dat het gemiddelde jaar-kilometrage van elektrische auto's gelijk is aan dat van de conventionele auto's die ze vervangen.

Elektrische auto's

Kosteneffectiviteit

De CO_2-kosteneffectiviteit van EV's wordt ingeschat op 280 €/ton CO_2 in 2030. Daarbij zijn de volgende kosten meegenomen:

- *Investeringskosten voertuigen:* gemiddelde meerkosten van volledige elektrische auto en plug-in hybride in 2030 is geschat op respectievelijk € 6.750 en € 4.000 per auto (o.a. op basis van TNO et al., 2015). Voor bepaling jaarlijkse afschrijvingskosten is uitgegaan van afschrijftermijn van 15 jaar.
- *Investeringskosten laadinfrastructuur*; investeringskosten laadpaal is verondersteld op € 1.000. Bij 1,2 laadpaal per auto kom je dan om € 2,4 miljard investeringskosten (TNO et al., 2015). Bij bepaling jaarlijkse kosten is wederom uitgegaan van afschrijvingstermijn van 15 jaar.
- *Operationele kosten laadinfrastructuur*; voor 2,4 miljoen laadpalen worden deze kosten ingeschat op € 5 miljoen per jaar (o.b.v. TNO et al., 2015).
- *Besparing energiekosten:* de verschuiving naar EV's leidt tot een daling van de energiekosten met ruim € 700 miljoen (excl. belastingen).

In de literatuur zijn niet/nauwelijks betrouwbare kentallen te vinden voor de onderhoudskosten voor elektrische auto's. Vandaar dat we, in lijn met TNO et al. (2015), uitgaan van dezelfde onderhoudskosten voor elektrische en conventionele auto's.

Tabel 9 Jaarlijkse kosten elektrische auto's in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten voertuigen	967
Investeringskosten laadinfrastructuur	216
Operationele kosten laadinfrastructuur	5
Energiekosten	-707
Netto kosten	481

Zero-emissie bussen

In 2030 rijden alle 5.000 OV-bussen in Nederland op elektriciteit, waterstof of groen gas.

De Green Deal Zero-emissie bussen heeft als doelstelling om in 2025 alleen nog maar nul-emissie OV-bussen in Nederland te hebben. Dit vereist echter dat vanaf nu alle bussen in nieuwe concessies emissievrij moeten zijn. Dit lijkt te ambitieus. Vandaar dat we er hier, in lijn met de visie duurzaam regionaal OV (IPO, 2015), vanuit gaan dat vanaf 2025 alle nieuwe bussen zero-emissie zijn. Dit betekent dat in 2030 80% van alle 5.000 OV-bussen emissievrij is (3.300 elektrische bussen, 850 waterstofbussen). Voor de overige bussen (850) wordt aangenomen dat ze op groengas rijden.

CO_2-reductie en energiebesparing

De instroom van zero-emissie bussen in het OV-bussenpark leidt in 2030 tot een CO_2-reductie van 0.2 Mton en een energiebesparing van 1.6 PJ.

Tabel 10 CO_2-reductie en energiebesparing zero-emissie bussen in 2030

	CO_2-reductie 2030	Energiebesparing 2030
Totaal effect (Mton/PJ)	0.2	1.6
Gemiddeld per bus (ton/MJ)	38	310.850

De gehanteerde kentallen in de berekeningen staan in Bijlage D. Verder is In de berekeningen voor alle bussen een gelijk jaarkilometrage aangenomen (63.000 km).

Zero-emissie bussen

Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit voor deze maatregel wordt ingeschat op ca. € 37 per ton CO_2.

De volgende posten zijn meegenomen in de berekening:

- *Investeringskosten voertuigen*: de hogere kosten van met name elektrische en waterstofbussen zorgen ervoor dat er ca. € 650 miljoen geïnvesteerd moet worden (gebaseerd op TNO et al., 2015). De jaarlijkse kosten in 2030 zijn dan gelijk aan € 59 miljoen.
- *Investeringskosten laad/tankinfrastructuur*: de cumulatieve investeringen in tank/laadinfrastructuur worden voor 2030 ingeschat op ca. 48 miljoen, wat neerkomt op jaarlijkse kosten van € 4 miljoen (gebaseerd op TNO et al., 2015).
- *Operationele kosten laad/tankinfrastructuur*: deze worden voor 2030 ingeschat op ca. € 0.6 miljoen (gebaseerd op TNO et al., 2015).
- *Besparing energiekosten:* de verschuiving naar zero-emissie bussen leidt tot een daling van de energiekosten met € 57 miljoen (excl. belastingen).

Voor de onderhoudskosten is aangenomen dat die voor alle typen bussen gelijk zijn. De kosten van eventuele aanpassingen aan de remise zijn niet meegenomen.

Tabel 11 Jaarlijkse kosten elektrische auto's in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten voertuigen	59
Investeringskosten laadinfrastructuur	4
Operationele kosten laadinfrastructuur	1
Energiekosten	-57
Netto kosten	7

Verhoging bijmenging biobrandstoffen

Het bijmengpercentage van biobrandstoffen wordt verhoogd naar 12% in 2030.

De EU Richtlijn hernieuwbare energie verplicht EU lidstaten om in 2020 een aandeel van 10% hernieuwbare energie te realiseren in het transport (EC, 2009). Vanwege dubbeltelling van 2e generatie biobrandstoffen en het (zwaar) meetellen van hernieuwbare elektriciteit voor transport, komt dit neer op 7,7% fysieke bijmenging (ECN/PBL, 2015). Voor de periode na 2020 zijn nog geen nieuwe afspraken gemaakt. Vandaar dat er in de Nationale Energie Verkenning 2015 voor 2030 wordt uitgegaan van hetzelfde bijtellingspercentage.

De hier bekeken maatregel is een verhoging van de fysieke bijmenging van biobrandstoffen van 7,7 naar 12% in 2030, waarbij de toename volledig wordt ingevuld met 2e generatie biobrandstoffen op basis van houtachtige biomassa.

CO_2-reductie

Een verhoging van de fysieke bijmenging van biobrandstoffen van 7,7 naar 12% in 2030 leidt tot een additionele 4,3% CO_2-reductie van het wegtransport. Uitgaande van een totale CO_2-uitstoot van 31,1 Mton in 2030 (NEV, 2015), komt de CO_2-reductie van deze maatregel uit op 1,3 Mton.

Kosteneffectiviteit

ECN en PBL (2016) veronderstellen dat de productiekosten van de benodigde biobrandstoffen ca. € 30/GJ bedragen in 2030. Omgerekend leidt dit tot meerkosten van 37 €ct/liter. De daaruit resulterende extra energiekosten bedragen € 184 miljoen. Naast deze kosten zijn er geen aanvullende kosten/baten van een verhoging van de bijmenging van biobrandstoffen.

De geschatte kosteneffectiviteit van de maatregel is € 138 per ton CO_2.

Minimaal Label C koopwoningen na verhuizing

De energetische kwaliteit van koopwoningen in Nederland wordt verbeterd.

Nieuwe eigenaren van koopwoningen worden verplicht om binnen twee jaar na aankoop de woning te verbeteren naar minimaal Label C. Aangezien naar verwachting ca. 50% van de koopwoningen in de periode tot 2030 van eigenaar zal wisselen, kan met deze maatregel de energetische kwaliteit van een groot deel van de bestaande voorraad koopwoningen in Nederland verbeterd worden.

Momenteel bestaat er geen handhavingssysteem om woningverbeteringen en labelstappen te controleren. Dit systeem zal opgezet moeten worden. De kosten hiervan zijn niet meegenomen bij de analyse van deze maatregel.

CO_2-reductie en energiebesparing

Het technisch potentieel voor energiebesparing bij een verbetering van koopwoningen naar minimaal Label C is door ECN en PBL (2016) m.b.v. hun variatietool ingeschat op ca. 86 PJ (93 PJ besparing op aardgas en 7 PJ extra elektriciteitsverbruik). Rekening houdend met een verwachte autonome energiebesparing in 2030 van ca. 39 PJ en het aandeel koopwoningen dat in die periode van eigenaar wisselt (ca. 52%), komt de energiebesparing uit op ca. 24 PJ. De bijbehorende CO_2-reductie is ingeschat op 1,2 Mton.

Tabel 12 CO_2-reductie en energiebesparing van minimaal Label C koopwoningen in 2030

	CO_2-reductie 2030	Energiebesparing 2030
Totaal effect (Mton/PJ)	1,2	24

Minimaal Label C koopwoningen na verhuizing

Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit van deze maatregel wordt voor 2030 ingeschat op € 277 per ton CO_2 (PBL en ECN, 2016). Evenals bij de andere maatregelen gaat het hierbij om de nationale kosteneffectiviteit. Voor de eindgebruiker (huiseigenaar) zal de maatregel kosteneffectiever uitpakken, omdat zij ook besparen op de energiebelasting.

De volgende posten zijn meegenomen bij de bepaling van de netto kosten van deze maatregel:

- *Investeringskosten*: de labelverbetering van de koopwoningen vereist de nodige investeringen. Door ECN en PBL (2016) is m.b.v. hun variatietool berekend wat de laagste kosten zijn om koopwoningen naar minimaal label C te verbeteren. De totale investeringssom voor de periode tot 2030 wordt ingeschat op ruim € 10 miljard, wat vertaald kan worden naar jaarlijkse kosten van € 547 miljoen in 2030.
- *Energiekosten*: de gerealiseerde energiebesparing leidt tot lagere energiekosten (de kosten voor elektriciteitsverbruik nemen weliswaar toe, maar die worden meer dan gecompenseerd door de besparingen op aardgasverbruik). Deze worden ingeschat op ca. € 221 miljoen per jaar in 2030.

Tabel 13 Jaarlijkse kosten van minimaal Label C koopwoningen (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten	547
Energiekosten	-221
Netto kosten	326

Nieuwbouw (bijna-)energieneutraal

Vanaf 2021 worden alle nieuwe woningen in Nederland bijna-energieneutraal gebouwen (BENG).

Om bijna energieneutraal te worden dienen de ca. 550.000 nieuw te bouwen woningen in de periode 2021-2030 te voldoen aan drie voorwaarden:

- maximale energiebehoefte van 25 kWh per m^2 gebruiksoppervlak per jaar;
- maximaal primair energieverbruik van 25 kWh per m^2 gebruiksoppervlak per jaar;
- minimaal aandeel hernieuwbare energie van 50%.

Ten opzichte van de huidige verplichte energieprestatiecoëfficiënt (EPC) van 0,4 betekent dit o.a. dat er extra geïsoleerd moet worden (vloer, gevel, dak, ramen) en een zonneboiler moet worden toegepast.

CO_2-reductie en energiebesparing

Ten opzichte van de huidige EPC-eis kan in 2030 een energiebesparing van ca. 10 PJ per jaar behaald worden (PBL en ECN, 2016). Als gevolg daarvan kunnen de CO_2-emissies afnemen met ca. 0,9 Mton per jaar.

Tabel 14 CO_2-reductie en energiebesparing van (bijna-)energieneutrale nieuwe woningen in 2030

	CO_2-reductie 2030	Energiebesparing 2030
Totaal effect (Mton/PJ)	0,9	10

Nieuwbouw (bijna-)energieneutraal

Kosteneffectiviteit

De nationale kosteneffectiviteit van deze maatregel wordt voor 2030 ingeschat op ca. € 166 per ton CO_2 (ECN en PBL, 2016). Voor eindgebruikers (woningeigenaren) is de maatregel kosteneffectiever, omdat zij ook besparen op energie-belastingen.

Bij de bepaling van de kosteneffectiviteit zijn de volgende kostenposten meegenomen:

- *Investeringskosten*: om aan de BENG-eis te voldoen dient er extra geïnvesteerd te worden in isolatiemaatregelen, zon-PV en zonneboilers. De totale investeringskosten in 2030 worden ingeschat op ca. € 4,5 miljard, wat neerkomt op ongeveer € 287 miljoen per jaar in 2030.
- *Systeemintegratiekosten*: er dienen extra kosten gemaakt te worden om de zon-PV te integreren in het bredere energiesysteem (ca. € 17 miljoen).
- Energiekosten: de gerealiseerde energiebesparing leidt tot een besparing op de energiekosten van ca. € 147 miljoen per jaar.

Tabel 15 Jaarlijkse kosten van bijna-energieneutrale nieuwe woningen (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten	287
Systeemintegratiekosten	17
Energiekosten	-147
Netto kosten	157

Minimaal Label B huurwoningen

De energetische kwaliteit van alle sociale huurwoningen in Nederland wordt verbeterd.

De ca. 2,5 miljoen sociale huurwoningen in Nederland moeten in deze maatregel vanaf 2020 een energielabel hebben dat minimaal Label B is. Daarmee gaat deze maatregel verder dan het huidige convenant tussen het Rijk en Aedes, de Woonbond en anderen, waarin voor 2021 wordt gestreefd naar een gemiddeld Energielabel B voor alle sociale huurwoningen (Ministerie van Binnenlandse Zaken et al., 2012). In tegenstelling tot dit convenant, dienen bij deze maatregel ook de 'slechtere' woningen aangepakt te worden.

CO_2-reductie en energiebesparing

De verplichting van minimaal Label B voor huurwoningen kan volgens PBL en ECN (2016) een energiebesparing van ca. 5 PJ opleveren in 2030 (additioneel t.o.v. het huidige huurconvenant). Dit resulteert in een CO_2-reductie van 0,3 Mton per jaar. Overigens zijn de effecten op de korte termijn aanzienlijk groter (15 PJ energiebesparing en 0,9 Mton CO_2-reductie in 2020).

Tabel 16 CO_2-reductie en energiebesparing van minimaal Label B huurwoningen in 2030

	CO_2-reductie 2030	Energiebesparing 2030
Totaal effect (Mton/PJ)	0,3	5

Minimaal Label B huurwoningen

Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit van deze maatregel wordt voor 2030 ingeschat op € 239 per ton CO_2 (PBL en ECN, 2016). Evenals bij de voorgaande maatregelen zal de kosteneffectiviteit voor de eindgebruiker (woningcorporatie/huurder) lager uitpakken, omdat zij ook besparen op de energiebelasting.

De kosten van deze maatregel zijn door PBL en ECN ingeschat m.b.v. hun variatietool. Daarbij zijn de volgende twee posten meegenomen:

- *Investeringskosten*: het verbeteren van de energetische kwaliteit van de huurwoningen vereisen de nodige investeringen. De jaarlijkse kosten voor 2030 worden ingeschat op € 113 miljoen. Deze extra kosten dienen initieel gedragen te worden door de woningcorporaties, maar zullen (gedeeltelijk) worden doorgerekend aan de huurders.
- *Energiekosten*: de gerealiseerde energiebesparing leidt tot lagere energiekosten voor de huurder. Voor 2030 leidt dit tot een jaarlijkse besparing van ca. € 49 miljoen.

Tabel 17 Jaarlijkse kosten van minimaal Label B huurwoningen (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten	113
Energiekosten	-49
Netto kosten	63

Sluiting van kolencentrales

Alle Nederlandse kolencentrales worden gesloten.

Nederlands heeft momenteel zeven kolencentrales, waarvan er in 2017 twee gaan sluiten. Daardoor blijven er in 2020 vijf kolencentrales over: GDF Maasvlakte, MMP 3 (Maasvlakte), Amer 9, Hemweg 8 en RWE-Eemshaven. In deze maatregel gaan we er vanuit dat ook deze laatste vijf kolencentrales voor 2020 gaan sluiten. Een neveneffect hiervan is dat ook de mee- en bijstook van biomassa in de kolencentrales vervalt, waardoor er gezocht moet worden naar andere maatregelen om de hernieuwbare energiedoelstellingen te halen.
De daarmee gepaard gaande effecten en kosten zijn in de analyse van deze maatregel niet meegenomen.

CO_2-reductie

Sluiting van de kolencentrales levert binnen Nederland ca. 17 Mton CO_2-reductie op (ECN en PBL, 2016).
Ruim 7 Mton is het gevolg van hogere netto import van elektriciteit, terwijl de rest van CO_2-reductie wordt gerealiseerd door substitutie van kolen door gas in de elektriciteitsproductie. De geïmporteerde elektriciteit leidt uiteraard tot CO_2-emissies in het buitenland (waarbij is aangenomen dat het hierbij gaat om elektriciteit uit gas-centrales), waardoor per saldo de CO_2-reductie ruim 9 Mton is.

Tabel 18 CO_2-reductie sluiting kolencentrales in 2030

Reductie CO_2-emissies Nederland	Extra CO_2-emissies buitenland	Netto reductie CO_2-emissies
16,7	7,4	9,3

Sluiting van kolencentrales

Kosteneffectiviteit

PBL en ECN (2016) schatten de kosteneffectiviteit van de sluiting van kolencentrales in op € 65 per ton CO_2. Bij de bepaling van deze kosteneffectiviteit zijn de volgende kosten- en batenposten meegenomen:

- *Energiekosten*: de belangrijkste kostenpost bestaat uit de extra inzet van aardgas i.p.v. kolen voor de opwekking van elektriciteit. Daarnaast wordt er meer elektriciteit geïmporteerd en minder geëxporteerd, wat leidt tot extra kosten. Tot slot dienen ook de besparingen op de inzet van meegestookte biomassa meegenomen te worden.
  De resulterende netto energiekosten bedragen € 1.122 miljoen.
- *Onderhoud- en beheerkosten*: de sluiting van de kolencentrales leidt tot lagere O&B-kosten. De jaarlijkse besparing wordt geschat op € 174 miljoen.
- *CO_2-kosten ETS*: dankzij de gerealiseerde CO_2-reductie hoeven er minder CO_2-emissierechten aangekocht worden. De baten hiervan worden ingeschat op € 340 miljoen per jaar.

Tabel 19 Jaarlijkse kosten sluiting kolencentrales in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Energiekosten	1.122
O&B-kosten	-174
CO_2-kosten ETS	-340
Netto kosten	608

Handhaving Wet milieubeheer

Handhaven verplichting energiebesparende maatregelen

Op grond van de Wet milieubeheer moeten instellingen en bedrijven energiebesparende maatregelen nemen als deze zich binnen 5 jaar terugverdienen. De wetgeving wordt op dit moment echter beperkt gehandhaafd; er worden weinig controles uitgevoerd of boetes uitgedeeld bij het niet naleven van de wet. Daarom is bij deze maatregel verscherpte handhaving voorzien en vergroot de overheid de uitvoerings-capaciteit bij de handhavende instanties.

CO_2-reductie en energiebesparing

Door ECN en PBL (2016) wordt ingeschat dat de verscherpte handhaving van de Wet milieubeheer kan leiden tot een besparing van gas en elektriciteit van in totaal 15 PJ in 2030. Deze energiebesparing leidt tot een CO_2-reductie van ca. 1 Mton.

Tabel 20 CO_2-reductie en energiebesparing handhaving Wet milieubeheer

	CO_2-reductie 2030 (Mton)	Energiebesparing 2030 (PJ)
Effect handhaving Wet milieubeheer	1,0	15

Handhaving Wet milieubeheer

Kosteneffectiviteit

Omdat het gaat om maatregelen met een korte terugverdientijd, leveren de maatregelen de maatschappij per saldo geld op, ondanks de extra handhavingskosten voor de overheid. De maatregel resulteert in een besparing van € 138 per ton CO_2 in 2030 (ECN en PBL, 2016).

De volgende kosten en baten zijn meegenomen in de berekening van de kosteneffectiviteit:

- *Investeringskosten:* de bedrijven en instellingen dienen te investeren in energiebesparende maatregelen, wat leidt tot extra investeringen. Deze worden door PBL en ECN (2016) ingeschat op € 677 miljoen. Bij een afschrijvingstermijn van 15 jaar vertaalt zich dit in jaarlijkse kosten van € 61 miljoen in 2030.
- *Energiekosten*: de besparing op de energiekosten wordt ingeschat op ca. € 176 miljoen per jaar.
- *Uitvoeringskosten:* de extra handhavingskosten worden ingeschat op € 10 miljoen per jaar.

Tabel 21 Jaarlijkse kosten handhaving Wet milieubeheer in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten	61
Energiekosten	176
Uitvoeringskosten	10
Netto kosten	-105

Wind op land

Wind op land is één van de goedkoopste hernieuwbare energietechnieken

Wind op land is een techniek waarop vol wordt ingezet in Nederland. Door de geografisch ligging van Nederland met veel wind, is het één van de goedkoopste hernieuwbare energietechnieken. Daarom is in het Energieakkoord afgesproken dat 6.000 MW is opgesteld in 2020.
Door problemen met ruimtelijke inpassing, is het verdere potentieel richting 2030 overigens relatief beperkt. Met het huidige voorgenomen beleid, stijgt het opgestelde vermogen naar zo'n 6.700 MW in 2030.

CO_2-reductie

Door wind op land wordt elektriciteitsopwekking door fossiele bronnen vervangen. In Nederland gaat het vooral om gasgestookte centrales en deels kolencentrales. De CO_2-reductie in 2030 bedraagt 7,4 Mton (ECN en PBL, 2016).

Tabel 22 CO_2-reductie wind op land in 2030

Effect	CO_2-reductie 2030
Totale CO_2-reductie (Mton/jaar)	7,4
Reductie per windmolen (kton/jaar)	3,3

Bij de bepaling van de CO_2-effecten van wind op land is uitgegaan van een molen met een gemiddeld vermogen van 3 MW en 2.700 vollasturen per jaar. Tevens is aangenomen dat alle energie die wordt ingezet wordt gebruikt in de vorm van elektriciteit.

Wind op land

Kosteneffectiviteit
De kosteneffectiviteit van wind op land verbetert sterk richting 2030 en bedragen zo'n € 20 per ton CO_2 (ECN en PBL, 2016).

In de berekening van de kosteneffectiviteit zijn door ECN en PBL de volgende kosten en baten meegenomen:

- *Investeringskosten windmolens:* deze kosten worden ingeschat op ca. € 9,2 miljard. Bij een afschrijftermijn van 20 jaar komen de jaarlijkse (afschrijvings)kosten uit op € 679 miljoen.
- *Onderhoud en beheerskosten:* deze kosten worden ingeschat op ca. € 368 miljoen per jaar.
- *Systeemintegratiekosten:* hierbij gaat het om de kosten van het integreren van de windenergie in het energiesysteem (bijv. balanceringskosten, kosten voor reservevermogen). Ze bedragen ca. € 300 miljoen per jaar.
- *Energiekosten:* de besparing op de kosten voor fossiele elektriciteitsproductie wordt ingeschat op ca. € 1,2 miljard per jaar.

Tabel 23 Jaarlijkse kosten wind op land in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten windmolens	679
O&B-kosten	368
Systeemintegratiekosten	300
Energiekosten	-1.196
Netto kosten	150

Wind op zee

Op Noordzee veel ruimte voor windparken

Alhoewel wind op zee duurder dan is dan wind op land, is het potentieel veel groter. In potentie kan in 2050 zo'n 150 TWh elektriciteit door wind op zee worden opgewekt. Dit is meer dan de huidige elektriciteitsvraag. In het Energieakkoord is afgesproken dat het opgestelde vermogen wind op zee stijgt naar 4.450 MW in 2023. Dit gebeurt door kavels op de Noordzee te tenderen, waarbij meerdere partijen kunnen bieden om een windpark te morgen realiseren. In de zomer 2016 wordt bekend gemaakt welke partij een windpark mag realiseren voor de Zeeuwse kust.

CO_2-reductie

Alhoewel het potentieel in theorie groot is, zal de hoeveelheid opgewekte elektriciteit met het huidige voorgenomen beleid in 2030 ongeveer vergelijkbaar zijn. De CO_2-reductie bedraagt ca. 7,2 Mton (ECN en PBL, 2016).

Tabel 24 CO_2-reductie wind op zee in 2030

Effect	CO_2-reductie 2030
Totale CO_2-reductie (Mton/jaar)	7,2
Reductie per windmolen (kton/jaar)	8,5

Bij de bepaling van de CO_2-effecten van wind op zee is uitgegaan van een molen met een gemiddeld vermogen van 5 MW en 4.115 vollasturen per jaar. Tevens is aangenomen dat alle energie die wordt ingezet wordt gebruikt in de vorm van elektriciteit.

Wind op zee

Kosteneffectiviteit
De kosten van wind op zee liggen hoger dan wind op land. De kosten zijn afhankelijk van aspecten zoals de waterdiepte en de afstand tot de kust. Naar schatting bedragen de kosten voor windenergie op zee in 2030 zo'n € 60 per vermeden ton CO_2 (ECN en PBL, 2016).

Evenals bij wind op land zijn de volgende kosten en baten meegenomen:
- *Investeringskosten windparken:* deze kosten bedragen ca. € 12 miljard, wat bij een afschrijvingstermijn van 20 jaar leidt tot jaarlijkse kosten van € 887 miljoen.
- *Onderhoud en beheerskosten:* ca. € 453 miljoen per jaar.
- *Systeemintegratiekosten*: de kosten om windenergie te integreren in het energiesysteem worden ingeschat op ca. € 290 miljoen per jaar.
- *Energiekosten:* de besparing op de kosten voor fossiele elektriciteitsproductie wordt ingeschat op ca. € 1,2 miljard per jaar.

Tabel 25 Jaarlijkse kosten wind op zee in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten windparken	892
O&B-kosten	456
Systeemintegratiekosten	292
Energiekosten	-1.167
Netto kosten	472

Grootschalige zonne-energie

De straling van de zon kan met een cel worden omgezet in elektriciteit.

Voor grootschalige zonneprojecten, zoals zonneweiden of op projecten op bedrijfsgebouwen, kan SDE+-subsidie worden aangevraagd. Hierdoor neemt het opgestelde vermogen naar verwachting snel toe (zonder deze subsidie zou grootschalige zon-PV niet rendabel zijn). In het jaar 2013 was het opgestelde vermogen nog nihil; het zal naar verwachting stijgen naar 3.000 MW in 2020 tot zo'n 8.000 MW in het jaar 2030. Hiermee levert grootschalige zonne-energie een substantiële bijdrage aan de Nederlandse elektriciteits-voorziening.

CO_2-reductie

Door de opwekking van zonnestroom wordt elektriciteits-opwekking door fossiele bronnen vervangen. De uitgespaarde CO_2-emissies bedragen naar verwachting 2,7 Mton in 2030 (ECN en PBL, 2016). Hierbij is aangenomen dat alle energie die wordt ingezet wordt gebruikt in de vorm van elektriciteit.

Kosteneffectiviteit

Ondanks dalende kosten, behoort zonne-energie nu nog steeds tot de duurdere technieken voor hernieuwbare energie-opwekking. De verwachting is echter dat de kosten verder dalen richting het jaar 2030. De kosten per uitgespaarde ton CO_2 bedragen zo'n € 90 per ton in 2030 (ECN en PBL, 2016).

Grootschalige zonne-energie

Bij de bepaling van de kosteneffectiviteit voor grootschalige zonne-energie zijn de volgende kosten en baten meegenomen:

- *Investeringskosten*: de investeringen in zon-PV (met name in de panelen) worden geschat op ca. € 7 miljard. Bij een afschrijvingstermijn van 20 jaar, komen de jaarlijkse kosten in 2030 uit op € 517 miljoen.
- *Onderhoud- en beheerskosten:* deze kosten bedragen ca. € 99 miljoen per jaar.
- *Systeemintegratiekosten:* de inpassing van zon-PV in het elektriciteitssysteem brengt kosten met zich mee, die voor 2030 worden ingeschat op € 59 miljoen.
- *Energiekosten:* de besparing op de kosten voor fossiele elektriciteitsproductie wordt ingeschat op ca. € 436 miljard per jaar.

Tabel 26 Jaarlijkse kosten grootschalige zon-PV in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten	517
O&B-kosten	99
Systeemintegratiekosten	59
Energiekosten	-436
Netto kosten	89

Bijstook van biomassa

Bijstook van biomassa in kolencentrales leidt tot lagere CO_2-emissies van elektriciteitsproductie in Nederland.

Deze maatregel gaat er voor 2030 vanuit dat er 37 PJ/jaar aan biomassa wordt bij- en meegestookt in de Nederlandse kolencentrales. Dit vereist dat minimaal de drie nieuwste kolencentrales openblijven, om voldoende capaciteit te hebben voor de biomassainzet (CE Delft, 2016). De bijstook van biomassa zonder afvang van CO_2 (CCS) past overigens niet in een emissievrije of -arme elektriciteitsproductie, die nodig is om de emissiedoelen voor 2050 te halen. Ook de beschikbaarheid van biomassa is beperkt, waardoor het de vraag is of bij/meestook de meest efficiënte besteding van de schaarse biomassa is. Deze kanttekeningen bij deze optie worden in dit rapport verder niet meegenomen.

CO_2-reductie

De CO_2-reductie die met deze maatregel gerealiseerd kan worden is rechtstreeks af te leiden uit de substitutie van kolen door biomassa. Uitgaande van een CO_2-emissiefactor van 94 kg CO_2 per GJ, levert dit een CO_2 reductie van 3,5 Mton op.

Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit van de bijstook van biomassa in kolencentrales wordt door PBL en ECN (2016) ingeschat op € 18 per ton CO_2.

In Tabel 27 (zie Pagina 51) is een overzicht gegeven van de verschillende kosten en baten van de bijstook van biomassa in kolencentrales.

Bijstook van biomassa

Zoals weergegeven in Tabel 27 zijn de volgende kostenposten meegenomen:

- *Investeringskosten aanpassingen installaties:* om bijstook van biomassa mogelijk te maken zijn (kleine) aanpassingen aan de kolencentrales noodzakelijk. Deze investeringen worden ingeschat op € 158 miljoen, wat zich vertaalt in jaarlijkse kosten van ca. € 17 miljoen.
- *Onderhoud- en beheerkosten*: door de bijstook van biomassa stijgen de onderhoud- en beheerkosten van de energiecentrales licht, met ca. € 7 miljoen per jaar.
- *Energiekosten*: de grootste kostenpost van deze maatregel wordt gevormd door het prijsverschil tussen kolen en biomassa (vooral houtpallets). Deze kosten worden ingeschat op € 109 per jaar in 2030.
- *CO_2-kosten ETS*: door de gerealiseerde reductie in CO_2-emissies hoeven er minder CO_2-emissierechten aangekocht te worden. De baten hiervan worden voor 2030 ingeschat op € 71 miljoen.

Tabel 27 Jaarlijkse kosten bijstook biomassa in 2030 (mln. €)

Kostenpost	Jaarlijkse kosten 2030
Investeringskosten	17
O&B-kosten	7
Energiekosten	109
CO_2-kosten ETS	-71
Netto kosten	61

Colofon

Delft, CE Delft, juli 2016

Deze publicatie is geschreven door:
Arno Schroten
Geert Warringa
Anouk van Grinsven

Publicatienummer: 16.4I99.88

Energievoorziening / Spoorwegen / Treinen / Duurzame energie / Energiebesparing / Kosten / Rendement / Maatschappelijke factoren / Economische factoren

Opdrachtgever: ProRail

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

© 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 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.