

ESG & Economie

Economisch Bureau | 30 april 2024

Wat zijn de marginale reductiekosten van de belangrijkste decarbonisatietechnologieën?

- Om de wereld koolstofvrij te maken en tegen 2050 netto-nul te worden, spelen decarbonisatietechnologieën een cruciale rol
- De kosten van deze technologieën vertoonden een dalende trend, maar deze trend is sinds 2019/2020 veranderd.
- Deze technologieën verlagen de uitstoot in die mate dat ook rekening moet worden gehouden met de uitstoot tijdens de levenscyclus
- De voetafdruk van de energiemix van een land bepaalt welke technologische opties het meest geschikt zijn om te komen tot een koolstofarme economie
- Een kleinere voetafdruk betekent minder decarbonisatieopties en hogere marginale reductiekosten
- De huidige ETS-koolstofprijs en de marginale reductiekosten voor de verschillende technologieën variëren aanzienlijk. De ETS-prijs moet sterk stijgen en/of technologieën moeten goedkoper worden om tijdig aan de transitiedoelstellingen te voldoen

Inleiding

Het doel is om de wereld koolstofvrij te maken en netto nul te worden tegen 2050. Decarbonisatietechnologieën spelen een cruciale rol in dit streven. Om dit te bereiken moet de prijs van de uitstoot van broeikasgassen hoog genoeg zijn om een gedragsverandering teweeg te brengen en investeringen decarbonisatietechnologieën haalbaar te maken. Daarnaast moeten de kosten van de belangrijke technologieën om koolstofarm te worden aantrekkelijk genoeg zijn om bedrijven te stimuleren om deze technologieën toe te passen. Idealiter moeten de kosten om koolstofarm te worden lager zijn dan de kosten om te betalen voor de broeikasgasvervuiling. Hier komen de marginale reductiekosten om de hoek kijken. De reductiekosten van een technologie zijn eenvoudigweg de kosten die gemaakt moeten worden om de uitstoot van broeikasgassen met één ton te verminderen. Concreet gaat het om de totale extra kosten, dat wil zeggen de investeringskosten plus het verschil in operationele kosten, gedeeld door de vermeden emissies. In deze analyse richten we ons op de marginale reductiekosten van de technologieën voor elektriciteitsopwekking en koolstofverwijderingstechnologieën. In deze marginale reductiekosten zijn belastingen en subsidies niet inbegrepen. We beginnen met het belang van de energiemix van een land en hoe dit de totale reductiekosten beïnvloedt. Daarna kijken we naar de kosten van de decarbonisatietechnologieën. We sluiten dit stuk af met de marginale reductiekosten per technologie.

Het belang van de energiemix

In dit deel tonen we de impact van de verschillende technologieën in de energiemix op de vermeden emissies. De vermeden emissies worden uitgedrukt in gram CO₂ equivalenten (CO₂eq) per kWh. CO₂eq is een metrische maat die wordt gebruikt om de uitstoot van verschillende broeikasgassen te vergelijken op basis van hun aardopwarmingsvermogen (*Global Warming Potential*, GWP), door de hoeveelheden van andere gassen om te rekenen naar de equivalente hoeveelheid koolstofdioxide met hetzelfde aardopwarmingsvermogen. *Global Warming Potential* is een term die wordt gebruikt om de relatieve potentie, molecuul voor molecuul, van een broeikasgas te beschrijven, rekening houdend met hoe lang het actief blijft in de atmosfeer. Kilowattuur of kWh is een meeteenheid voor energieverbruik. Eén kilowatt is gelijk aan 1000 watt.

We beginnen met het mondiale beeld in 2022. De fossiele brandstofmix van de wereldwijde elektriciteitsopwekking is 36% kolen, 23% gas, 15% waterkracht, 9% kernenergie, 7% windenergie, 5% zonne-energie en 5% uit andere bronnen. De voetafdruk van deze energiemix is ongeveer 507 gr CO₂eq per kWh.

Europa heeft een andere energiemix dan het wereldwijde gemiddelde. Voor Europa in 2022 is de energiemix 17% kolen, 26% gas, 15% waterkracht, 19% kernenergie, 11% windenergie, 5% zonne-energie en 7% uit andere bronnen. Door het lagere aandeel kolen, maar het hogere aandeel kernenergie en windenergie is de Europese voetafdruk lager dan het mondiale gemiddelde, namelijk ongeveer 324 gr CO₂eq per kWh. Elk land heeft zijn eigen energiemix en dus zijn eigen voetafdruk. Waarom is dit belangrijk bij het berekenen van marginale reductiekosten? Als een land een hogere voetafdruk heeft, zijn meer technologieën aantrekkelijk om de BKG emissies te

reduceren, terwijl als de voetafdruk lager is, minder technologieën aantrekkelijk zijn om te reduceren. Dit komt doordat de totale vermeden emissies lager zijn, en dit vertaalt zich in hogere marginale reductiekosten per technologie (meer hierover verderop in deze analyse). In de onderstaande tabel geven we een overzicht van de emissies van de levenscyclusanalyse van de belangrijkste technologieën voor elektriciteitsopwekking en de voetafdruk van de energiemix per land.

Levensloopemissies per technologie

in gram per CO₂eq per kWh

	Europa	Duitsland	Frankrijk	Spanje	Nederland	VS	Global
Energiemix voetafdruk 2022	324	409	61	172	302	386	507
Elektriciteitsproductie							
Steenkool	1023	1023	1023	1023	1023	820	820
Kolen met koolstofafvang en -opslag (CCS, -64% emissies)	369	369	369	369	369	295	295
Gas							
Gecombineerde cyclus gasturbine (CCGT)	340	340	340	340	340	340	340
CCGT met CCS (-70%)	102	102	102	102	102	102	102
CCGT waterstof	289	289	289	289	289	289	289
Open gasturbine (OCGT)	520	520	520	520	520	520	520
OCGT met CCS (-70%)	156	156	156	156	156	156	156
OCGT waterstof	289	289	289	289	289	289	289
Wind							
Op land	12	12	12	12	12	11	12
Offshore	14	14	14	14	14	14	14
Zonne-energie							
Utility scale	41	41	41	41	41	36	41
Waterkracht							
	11	11	11	11	11	11	11
Kernenergie							
	5	5	5	5	5	5	5
Geothermie							
	45	45	45	45	45	45	45
Bio-energie							
	230	230	230	230	230	230	230

Bron: ABN AMRO Economisch Bureau, Irena, EMBER, Bloomberg NEF, NREL, Unece, IEA, GREEN-NCAP, ICCT, Argonne National laboratory, MIT CEEPR WP2022-017, World Resource Institute, scientific reports

Aan de ene kant heeft Frankrijk de laagste voetafdruk omdat 65% van zijn elektriciteit wordt opgewekt door kernenergie, die een lage uitstoot per opgewekte kWh heeft (zie [hier](#) voor meer informatie). Maar de resultaten van de levenscyclusmissies van kernenergie variëren aanzienlijk afhankelijk van het type reactor. Volgens een studie (zie [hier](#) voor meer informatie) varieert de gemiddelde koolstofuitstoot van de verschillende reactortypes tussen 4 en 43 gram CO₂ per kWh.

Aan de andere kant heeft de elektriciteitsmix van Duitsland de hoogste voetafdruk in dit overzicht (Global uitgesloten). Dit komt doordat Duitsland vrij veel steenkool inzet voor de energievoorziening. Er wordt bijvoorbeeld nog steeds 27% steenkool gebruikt, vergeleken met slechts 2% in Frankrijk. Maar de hoge percentages zon en wind compenseren gedeeltelijk het aanzienlijke gebruik van steenkool in Duitsland.

Nederland heeft ook een hoog aandeel zon en wind, maar ook een hoog aandeel aardgas. Omdat dit minder CO₂eq per kWh uitstoot, is de totale voetafdruk lager dan in Duitsland, maar hoger dan in Frankrijk.

Voor de marginale reductiekosten zijn de vermeden emissies belangrijk. Dit is het verschil tussen de voetafdruk van de energiemix van een land en de levenscyclusmissies van een technologie. Duitsland heeft bijvoorbeeld een voetafdruk van 409 gram CO₂eq per kWh opgewekte elektriciteit. Zonne-energie heeft een levenscyclusmissie van eenenveertig gram CO₂eq per kWh. De vermeden uitstoot als je alleen zonne-energie zou gebruiken, zou dus 409 - 41 = 368 gram CO₂eq per kWh zijn. Dit zou de voetafdruk van Duitsland aanzienlijk verkleinen. Voor Frankrijk zou zonne-energie ook de uitstoot verminderen, maar in veel mindere mate. De vermeden emissies zouden 61 - 41 = 20 gram CO₂eq per kWh zijn. Dit betekent dat voor dezelfde technologie, ongeacht de kosten, de marginale reductiekosten veel hoger zouden zijn.

Kosten per technologie

Naast de energiemix hebben ook de totale extra kosten van de opgewekte elektriciteit invloed op de marginale reductiekosten. Hiervoor hebben we de *levelized costs of electricity* (LCOE) van de hernieuwbare technologieën genomen, exclusief belastingen en subsidies. LCOE is de contante waarde van de totale kosten gedurende de levensduur gedeeld door de contante waarde van alle elektriciteit die gedurende de levensduur is opgewekt. De uitkomst zijn de kosten in Amerikaanse dollars per kWh elektriciteit. Tussen 2010 en 2022 zijn deze kosten voor de belangrijkste hernieuwbare technologieën aanzienlijk gedaald (zie onderstaande tabel). Dit zijn

mondiale gemiddelden. De kosten voor zonne-energie daalden met 89%, geconcentreerde zonne-energie en windenergie op land met bijna 70% en windenergie op zee met bijna 60%. Lagere kosten leiden ook tot lagere marginale reductiekosten voor de verschillende technologieën. Alleen de kosten voor waterkracht en geothermische energie zijn in deze periode gestegen.

Levelized cost of electricity 2010-2022

in USD per kWh

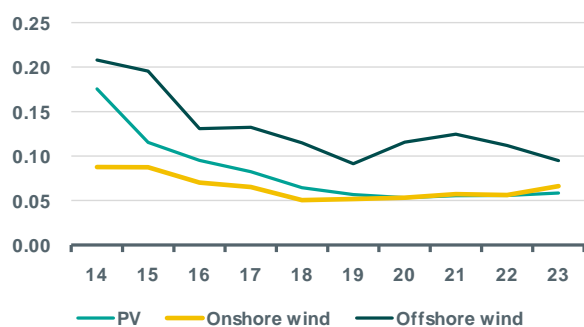
	Levelised cost of electricity (2022 USD/kWh)		
	2010	2022	Percent change
Bio-energie	0.082	0.061	-25%
Geothermie	0.053	0.056	6%
Waterkracht	0.042	0.061	47%
Zon-PV	0.445	0.049	-89%
Geconcentreerde zonne-energie	0.380	0.118	-69%
Windenergie op land	0.107	0.033	-69%
Windenergie op zee	0.197	0.081	-59%

Bron: Irena

Dezelfde trend is te zien voor zon en wind in Duitsland en Nederland, maar in de afgelopen jaren is de daling van de kosten voor deze technologieën vertraagd of zelfs gedeeltelijk omgekeerd (zie onderstaande grafieken). Voor Duitsland waren fotovoltaïsche energie (PV) en windenergie op land het goedkoopst in 2020 en daarna zijn de kosten licht gestegen. Voor Nederland was offshore wind het goedkoopst in 2019 en onshore wind in 2020. Sindsdien zijn deze technologieën duurder geworden. Tussen 2019 en 2023 zijn de kosten van offshore wind voor Nederland volgens Bloomberg NEF met 87% gestegen en in 2023 met 49%. Tussen 2020 en 2023 zijn de kosten van windenergie op land voor Nederland met 12% gestegen en de helft daarvan was in 2023.

LCOE Duitsland voor zon-PV en wind

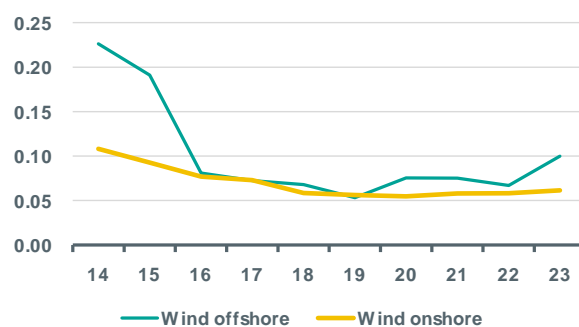
in USD per kWh



Bron: Bloomberg NEF

LCOE Nederland voor wind

in USD per kWh



Bron: Bloomberg NEF

Marginale reductiekosten

We hebben ons gericht op de emissies van broeikasgassen van de energiemix (in gram CO₂eq per kWh), de vermeden emissies (in gram CO₂eq per kWh) en de genivelleerde elektriciteitskosten van de verschillende technologieën (de LCOE, in USD per kWh). Nu is het tijd om deze elementen samen te brengen, aangezien ze de inputvariabelen zijn voor de berekening van de marginale reductiekosten (in USD per ton CO₂eq, 1 ton = 1 miljoen gram). Aangezien er een gebrek is aan gegevens over de genivelleerde elektriciteitskosten van de verschillende technologieën voor de verschillende landen, gebruiken we de gegevens van Duitsland als benchmark voor de andere Europese landen.

De tabel hieronder toont de marginale reductiekosten voor de verschillende technologieën. Een "x" betekent dat deze technologie niet zal leiden tot lagere emissies in vergelijking met de voetafdruk van de huidige energiemix. Sommige technologieën hebben extreem hoge prijzen, zoals steenkool met CCS of gas met CCS. Dit geeft aan dat steenkool of gas met CCS slechts een beperkte hoeveelheid vermeden emissies zullen opleveren in vergelijking met de energiemix, terwijl de totale kosten hoog zijn. Daarom zijn de marginale reductiekosten van deze technologieën extreem hoog voor Duitsland. Voor de VS wordt dit gedeeltelijk gecompenseerd door de lagere genivelleerde elektriciteitskosten. De meest aantrekkelijke opties voor de VS zijn windenergie op land, zonne-energie en geothermische energie (zie onderstaande tabel).

Frankrijk heeft minder opties om haar BKG emissies te verminderen. Dit komt omdat heel wat van deze technologieën een grotere voetafdruk hebben dan de energiemix. Zelfs als deze technologieën een lagere uitstoot per kWh hebben, zullen de vermeden emissies relatief laag zijn, waardoor de marginale reductiekosten stijgen. Daarom zijn de marginale reductiekosten opmerkelijk hoog.

Duitsland heeft één van de hoogste voetafdrukken in dit overzicht. Daarom heeft dit land veel meer opties om haar BKG emissies te verlagen en zijn de reductiekosten ook lager dan bijvoorbeeld in Frankrijk. Voor Duitsland zijn zonne-energie, geothermische energie en windenergie op land de meest aantrekkelijke opties.

Marginale reductiekosten

USD per ton CO₂eq

	Europe	Germany	France	Spain	NL	US	Global
Elektriciteitsproductie							
Steenkool	x	x	x	x	x	x	x
Kolen met koolstofafvang en -opslag (CCS, -64% emissies)	x	2906	x	x	x	1914	566
Gas							
Gecombineerde cyclus gasturbine (CCGT)	x	2071	x	x	x	1535	718
CCGT met CCS (-70%)	702	509	x	2229	781	275	296
CCGT waterstof	6676	1973	x	x	x	2442	1081
Open gasturbine (OCGT)	x	x	x	x	x	x	x
OCGT met CCS (-70%)	3327	2217	x	35002	3843	967	1253
OCGT waterstof	17061	5042	x	x	x	6241	2763
Wind							
Op land	192	167	1152	332	211	139	87
Offshore	242	241	4442	602	348	428	485
Zonne-energie							
Utility scale	229	158	2647	313	343	180	105
Waterkracht							
	265	209	1649	515	285	221	123
Kernenergie							
	1278	1011	7296	2445	1375	980	797
Geothermie							
	229	158	2647	313	343	180	105
Bio-energie							
	975	515	x	x	1283	392	220
Technologieën voor koolstofverwijdering							
Koolstofafvang en -opslag							70-250
Direct Air Capture							250-1600
Herbebossing							10-50

Bron: ABN AMRO Economisch Bureau, Irena, EMBER, Bloomberg NEF, NREL, Unece, IEA, GREEN-NCAP, ICCT, Argonne National laboratory, MIT CEEPR WP2022-017, World Resource Institute, scientific reports

In de bovenstaande tabel staan ook de marginale reductiekosten voor koolstofverwijderingstechnologieën. Deze kosten zijn in USD per ton CO₂ en niet USD per CO₂eq is zoals de rest van de tabel. Herbebossing is duidelijk de meest aantrekkelijke optie. De reductiekosten voor *Direct Air Capture* variëren sterk. Deze technologie is energie-intensief vanwege de lage CO₂-concentratie in de atmosfeer en de efficiëntie hangt af van het feit of er al dan niet hernieuwbare energiebronnen worden gebruikt voor de opwekking van elektriciteit.

Zoals hierboven vermeld zijn de marginale reductiekosten in USD per ton CO₂eq, terwijl de ETS-prijs geldt voor één ton CO₂ (zonder de impact van andere broeikasgassen). Zelfs als we dit als richtlijn nemen, wijken de ETS-prijs en de marginale reductiekosten aanzienlijk van elkaar af. Dit geeft aan dat de technologieën goedkoper moeten worden of dat de ETS-prijs aanzienlijk moet stijgen om de transitie levensvatbaar te houden. Bovendien hebben de marginale reductiekosten de neiging om te stijgen als de voetafdruk van de energiemix afneemt. Dit zou de vereiste ETS-prijs dus meer onder opwaartse druk kunnen zetten. Een optie om de marginale reductiekosten te verlagen is het introduceren of verhogen van subsidies voor bepaalde technologieën.

Conclusie

Het doel is om de wereld koolstofvrij te maken en netto nul te bereiken tegen 2050. In dit traject spelen decarbonisatietechnologieën een cruciale rol. Tussen 2010 en 2022 zijn de kosten van de meeste hernieuwbare technologieën aanzienlijk gedaald, maar onlangs zijn sommige weer duurder geworden. De toepassing van deze technologieën zal resulteren in lagere emissies voor de energiemix van de elektriciteitsopwekking. Maar omdat ze ook levenscyclusemissies hebben, kan alleen het verschil tussen deze emissies en de voetafdruk van de energiemix van een land worden beschouwd als vermeden emissies. De voetafdruk van de energiemix heeft een directe invloed op de vermeden emissies voor elke technologie in elk land. Een lagere voetafdruk van de energiemix en daardoor lagere vermeden emissies doen de marginale reductiekosten stijgen. Als landen erin slagen om de voetafdruk van de energiemix te verlagen, zal het dus moeilijker zijn om aantrekkelijke opties te vinden om de economie verder koolstofarm te maken. Over het geheel genomen wijken de marginale reductiekosten aanzienlijk af van de ETS-prijs. De ETS-prijs moet dus sterk stijgen en/of deze technologieën moeten goedkoper worden om de transitie tijdig te realiseren.

Econoom

Georgette Boele, Senior Economist Sustainability | georgette.boele@nl.abnamro.com

DISCLAIMER

Dit document is opgesteld door ABN AMRO. Het is uitsluitend bedoeld om financiële en algemene informatie over economie te verstrekken. De informatie in dit document is strikt vertrouwelijk en wordt u uitsluitend ter informatie verstrekt. Het mag niet (geheel of gedeeltelijk) worden gereproduceerd, gedistribueerd of doorgegeven aan derden of worden gebruikt voor andere doeleinden dan hierboven vermeld. Dit document is informatief van aard en vormt geen aanbod van effecten aan het publiek, noch een uitnodiging tot het doen van een dergelijk aanbod.

Er mag voor geen enkel doel worden vertrouwd op de informatie, meningen, voorspellingen en veronderstellingen in het document of op de volledigheid, nauwkeurigheid of billijkheid ervan. Er wordt door of namens ABN AMRO, haar directeuren, functionarissen, agenten, gelieerde ondernemingen, groepsmaatschappijen of werknemers geen verklaring of garantie, expliciet of impliciet, gegeven met betrekking tot de juistheid of volledigheid van de informatie in dit document en er wordt geen aansprakelijkheid aanvaard voor enig verlies dat direct of indirect voortvloeit uit het gebruik van dergelijke informatie. De opvattingen en meningen in dit document kunnen op enig moment wijzigen en ABN AMRO is niet verplicht om de informatie in dit document na de datum van dit document te actualiseren.

Voordat u in een product van ABN AMRO Bank N.V. belegt, dient u informatie in te winnen over de verschillende financiële en andere risico's en mogelijke beperkingen waarmee u en uw beleggingsactiviteiten te maken kunnen krijgen op grond van toepasselijke wet- en regelgeving. Als u na het lezen van dit document overweegt om in een product te beleggen, wordt u geadviseerd om een dergelijke belegging te bespreken met uw relatiebeheerder of persoonlijke adviseur en na te gaan of het betreffende product - gezien de risico's - past binnen uw beleggingsactiviteiten. De waarde van uw beleggingen kan fluctueren. In het verleden behaalde resultaten bieden geen garantie voor de toekomst. ABN AMRO behoudt zich het recht voor om wijzigingen aan te brengen in dit materiaal.

© Copyright 2024 ABN AMRO Bank N.V. en gelieerde bedrijven ("ABN AMRO")