



Actualisatie zeefstudie voor SDE++-subsidieronde 2024

Kosteneffectieve alternatieven voor
CCS.



Committed to the Environment

Actualisatie zeefstudie voor SDE++- subsidieronde 2024

Kosteneffectieve alternatieven voor CCS.

Dit rapport is geschreven door:
Charley Bakker, Kris Manna, Maarten de Vries

Delft, CE Delft, januari 2024

Publicatienummer: 24.230441.002

Oprichtgever: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Kenmerk: 202311010

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

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Maarten de Vries (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 sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	5
	1.1 Aanleiding	5
	1.2 Doel en methode	5
	1.3 Afbakening	7
	1.4 Leeswijzer	8
2	Methodologie	9
	2.1 Algemene aanpak	9
	2.2 Bepaling subsidie-intensiteit en gevoeligheidsanalyse	9
3	Resultaten	11
	3.1 Evaluatie kosteneffectiviteit per proces	11
	3.2 Vergelijking met resultaten zeefstudie SDE++ 2023	15
4	Conclusie	18
	4.1 Hoofdconclusie	18
	4.2 Conclusie voor de CCS-gerelateerde categorieën van de SDE++	18
	4.3 Duiding van de resultaten	19
	Bronnen	20
A	Uitwerking technieken	21
	A.1 CCS-technieken	21
	A.2 Hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie	22
	A.3 Waterstofboiler	23
	A.4 Boiler op vaste biomassa	23
	A.5 Toepassing van groengas	23
	A.6 Restwarmtestoom	24
	A.7 Procesfornuis op waterstof	24
	A.8 Procesfornuis op vaste biomassa	25
	A.9 Mechanical Vapour Recompression (MVR)	25
	A.10 Productie van groene waterstof	25



Samenvatting

Aanleiding

In het Nederlandse Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019) is afgesproken dat subsidiëring van Carbon Capture and Storage (CCS) niet ten koste mag gaan van de ontwikkeling van alternatieve, schone energietechnieken. Daarom is subsidiëring van CCS-projecten via de SDE++ gereguleerd, onder andere via de zogenoemde 'zeef'. Daarbij wordt per relevant industrieel proces gekeken of er aantoonbare kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS. Als die er zijn, wordt CCS volgens de afspraken in het Klimaatakkoord niet gesubsidieerd. Er zijn momenteel acht verschillende categorieën voor CCS-technieken binnen de SDE++. Als er voor één van deze categorieën kosteneffectieve alternatieven worden geïdentificeerd, dan wordt de betreffende SDE-categorie uitgesloten van subsidie.

In 2022 heeft CE Delft op verzoek van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat de methodiek om de zeef toe te passen herzien (CE Delft, 2022) en uitgewerkt voor de SDE++-subsidieronde van 2023 (CE Delft, 2023). In deze studie wordt de zeef toegepast voor de SDE++ van 2024, op basis van dezelfde methode.

Aanpak

Omdat er geen noodzaak is om alle onderdelen van de zeefmethodiek elk jaar opnieuw te evalueren, is voor 2024 gekozen voor een beperkte actualisatie. Hierbij wordt het eerste deel van de zeefmethodiek, waarin een shortlist van relevante duurzame alternatieve technieken voor CCS wordt vastgesteld, niet opnieuw uitgevoerd. We gaan voor 2024 dus uit van dezelfde alternatieve technieken en CCS-referentietechnieken als vorig jaar. Het tweede deel van de methodiek, waarin de subsidie-intensiteit van zowel de alternatieven als CCS bepaald wordt, voeren we wel opnieuw uit. Dit gebeurt op basis van het Onrendabele Top-model (OT-model) van het PBL voor 2024 en aanvullende literatuur. Voor 2025 zal de zeefmethodiek wel weer volledig worden uitgevoerd, zodat ook eventuele nieuwe alternatieve technieken kunnen worden geïdentificeerd.

Ten opzichte van vorig jaar waren er geen grote wijzigingen in het OT-model of in de aanpak als geheel.

Resultaten en conclusies

De conclusies van onze kosteneffectiviteitsanalyse zijn in kwalitatieve zin onveranderd ten opzichte van vorig jaar. Net als vorig jaar vonden we dat één techniek, namelijk 'mechanische stoomrecompressie' (MVR), een kosteneffectief alternatief is voor CCS voor het indampen van waterige oplossingen. De CCS-categorie die van toepassing is voor het indampen van waterige oplossingen (categorie 5A in de SDE: post-combustion-afvang, gasvormig transport) omvat echter veel meer processen dan alleen indampen, en CCS is voor die processen vaak wel een kosteneffectief alternatief. Daarom is het niet mogelijk om op basis van de kosteneffectiviteit van MVR de gehele categorie 5A uit te sluiten van de SDE++. De andere onderzochte technieken zijn (nog) niet kosteneffectiever dan CCS.

Opvallend aan de resultaten van de zeef voor 2024 ten opzichte van die voor 2023, is dat de subsidie-intensiteiten van de CCS-referentietechnieken over het algemeen omlaag zijn gegaan. De reden hiervoor is dat voor al deze technieken de verwachte opbrengsten (i.e. langetermijnprijs) relatief harder zijn gestegen dan het basisbedrag. De SDE++ vergoedt het verschil in kostprijs en verwachte opbrengsten; dit resulteert daardoor in een lagere subsidie-intensiteit. De toename van verwachte opbrengsten, ook wel de vermeden kosten, is voor de CCS-technieken uitsluitend gerelateerd aan de langetermijn-CO₂-prijs, die met 16% is toegenomen.

De subsidie-intensiteiten voor de duurzame alternatieve technieken zijn over het algemeen juist toegenomen door gestegen basisbedragen. Het verschil in subsidie-intensiteit tussen de alternatieven en de CCS-technieken is daarmee toegenomen. Qua kosteneffectiviteit zijn de alternatieve technieken daardoor verder van CCS verwijderd geraakt. Vanuit het oogpunt van verduurzaming van de industrie is dit geen gunstige ontwikkeling. CCS met fossiele CO₂ wordt immers beschouwd als een tijdelijke oplossing om de emissiereductiedoelstellingen voor de industrie in 2030 te halen. Op lange termijn zouden de productieprocessen zelf verduurzaamd moeten worden, op basis van de onderzochte alternatieven. Hoge kosten vormen hiervoor nu mogelijk een belemmering.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Sinds 2020 staat de subsidieregeling Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++) open voor aanvragen op het gebied van Carbon Capture and Storage (CCS). In het Nederlandse Klimaatakkoord is afgesproken dat subsidiëring van CCS niet ten koste mag gaan van de ontwikkeling van alternatieve, schone energietechnieken.

Daarom is subsidiëring van CCS-projecten ingekaderd, onder andere via de zogenoemde zeefmethodiek. Daarbij wordt gekeken of er aantoonbare kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS die binnen dezelfde termijn kunnen worden gerealiseerd.

Er zijn momenteel acht verschillende categorieën voor CCS-technieken binnen de SDE++. Als er voor één van deze categorieën kosteneffectieve alternatieven worden geïdentificeerd, dan wordt de betreffende SDE-categorie uitgesloten van subsidie.

Het staat bedrijven dan nog steeds vrij om CCS toe te passen, alleen is hier dan geen SDE++-subsidie voor beschikbaar.

In 2022 heeft CE Delft op verzoek van het ministerie van EZK de methode om te bepalen of er kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS ('de zeefmethodiek') herzien (CE Delft, 2022). Tevens heeft CE Delft deze herziene methode toegepast met het oog op de SDE++ van 2023 (CE Delft, 2023).

Het ministerie van EZK heeft CE Delft gevraagd om de methode toe te passen voor de subsidieronde van 2024. Dit rapport vormt de uitwerking van deze actualisatie.

1.2 Doel en methode

Het doel van dit onderzoek is om aan te tonen of er op dit moment kosteneffectieve duurzame alternatieven bestaan voor de CCS-categorieën onder de SDE++. In het geval dat er kosteneffectieve alternatieven worden geïdentificeerd, kan het ministerie van EZK op basis hiervan besluiten om de corresponderende CCS-categorieën uit te sluiten van de SDE++-subsidieronde in 2024.

In dit rapport worden de begrippen kosteneffectiviteit en subsidie-intensiteit afwisselend gebruikt omdat ze nauw verband met elkaar houden. Kosteneffectiviteit duidt op de mate waarin een techniek subsidie vereist om financieel rendabel te zijn. Een lagere subsidie-behoefte, ook wel subsidie-intensiteit, betekent dat de techniek kosteneffectiever is. De overheid hoeft immers minder subsidie uit te keren. De subsidie-intensiteit wordt als volgt berekend: $\text{Subsidie-intensiteit} = (\text{Basisbedrag} - \text{Langetermijnprijs}) / \text{Netto vermeden emissies in kg CO}_2/\text{eenheid}$.

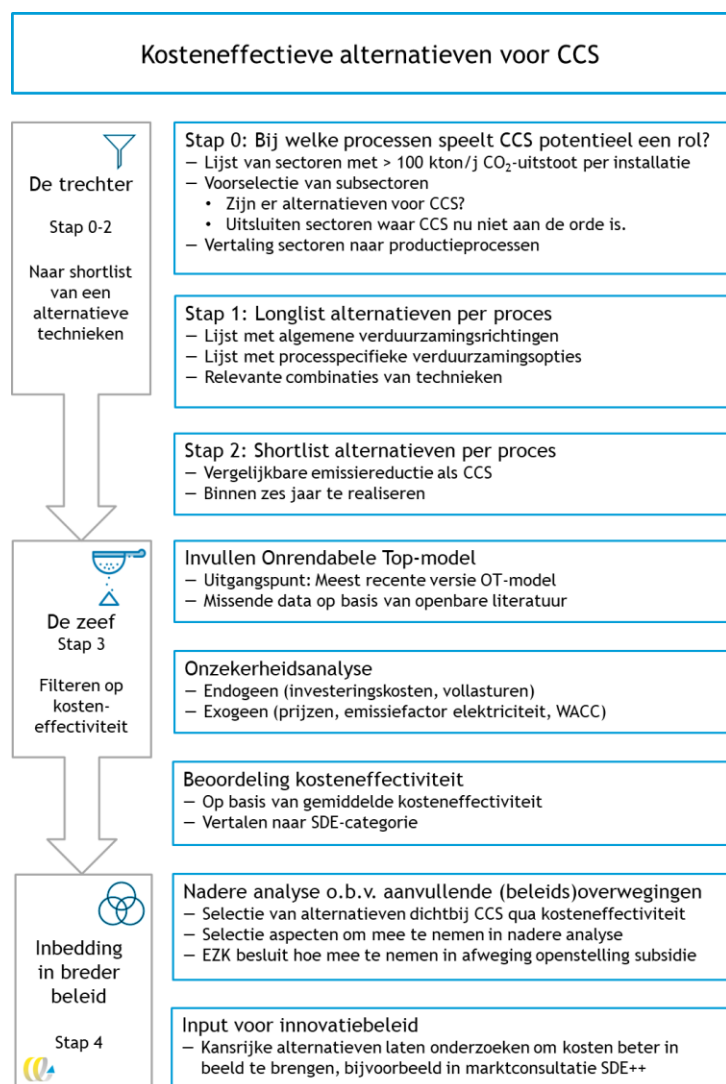
Om de kosteneffectiviteit van potentiële alternatieve technieken te bepalen zal de methode van CE Delft (CE Delft, 2022) gevolgd worden. Voor de berekening van de subsidie-intensiteit baseert deze methode zich op het 'Onrendabele Top' (OT) Model van het PBL. Dit openbare model wordt jaarlijks geüpdatet en in maart gepubliceerd. Om de meest actuele data te kunnen gebruiken, hebben wij het OT-model van 2024 onder embargo van het PBL ontvangen voor het uitvoeren van dit onderzoek.

De zeefmethodiek van CE Delft (2022) bestaat uit drie delen (zie Figuur 1). In het eerste deel (de ‘trechter’) worden industriële processen waarbij CCS potentieel een rol speelt geïdentificeerd. Voor deze processen worden vervolgens duurzame alternatieve technieken gezocht. Deze lijst van alternatieven wordt teruggebracht tot een shortlist op basis van twee criteria: 1) de CO₂-reductie moet vergelijkbaar zijn met CCS, en 2) de implementatietijd van het alternatief mag maximaal zes jaar bedragen.

In de volgende stap, de eigenlijke ‘zeef’, wordt vervolgens per proces voor elk van de alternatieven (en voor CCS) op basis van het OT-model de subsidie-intensiteit bepaald. Hoe hoger de subsidie-intensiteit, des te minder kosteneffectief de techniek is. Op basis hiervan kan vervolgens worden vastgesteld of er kosteneffectieve alternatieven zijn voor CCS, en of een SDE-categorie voor CCS van subsidie kan worden uitgesloten.

In de laatste stap worden in een nadere analyse enkele (beleids)overwegingen behandeld die meegenomen kunnen worden in het besluit om wel of geen subsidie te verlenen. Ook wordt besproken hoe de resultaten van de zeef benut kunnen worden voor het bredere innovatiebeleid.

Figuur 1 - Schematische weergave van de herziene zeefmethodiek



1.3 Afbakening

Met het oog op het doel van de zeef is het niet noodzakelijk om alle stappen van de zeef-methodiek elk jaar opnieuw uit te voeren. Dit geldt met name voor stappen binnen de ‘trechter’. De processen waarvoor CCS-potentieel interessant is en de alternatieve technieken die mogelijk zijn, veranderen immers niet van de ene op de andere dag. Wel moeten deze stappen, incl. specifieke onderdelen zoals het uitsluiten van sectoren waar CCS nu niet aan de orde is, periodiek worden geëvalueerd om de uitgangspunten van de methode correct te houden.

Het ministerie van EZK en CE Delft zijn daarom overeengekomen dat voor de subsidieronde van 2024 de trechter niet opnieuw wordt uitgevoerd. De zeef zelf wordt wel opnieuw uitgevoerd, op basis van de shortlist van elf duurzame alternatieve technologieën (en een zestal fossiele referentietechnieken) die uit de zeefstudie voor 2023 naar voren is gekomen (CE Delft, 2023).

Deze shortlist bestaat uit de volgende technieken:

Duurzame alternatieven:

1. Hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie.
2. Waterstofboiler.
3. Boiler op vaste biomassa.
4. Boiler op groengas.
5. Restwarmtestoom.
6. Procesfornuis op waterstof.
7. Procesfornuis op vaste biomassa.
8. Procesfornuis op groengas.
9. Mechanical vapour recompression (MVR).
10. Productie van groene waterstof.
11. Reforming van groengas.

Fossiele referentietechnieken

1. Aardgasgestookte boiler met post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
2. Aardgasgestookt procesfornuis met post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
3. Bestaande SMR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
4. Bestaande SMR op aardgas, post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
5. Nieuwe SMR op aardgas, post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
6. Nieuwe ATR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.

Omdat we voor deze actualisatie het eerste deel van de herziene zeefmethodiek (de ‘trechter’) niet opnieuw hebben uitgevoerd, hebben we net als vorig jaar voor gasvormig CO₂-transport gekozen en niet voor vloeibaar transport.

CCS maakt voornamelijk gebruik van gasvormig transport via pijpleidingen. Voor grote volumes van meerdere kilotonnen CO₂ per jaar is dit de meest economische optie vergeleken met vloeibaar transport per schip of vrachtwagen. Het OT-model geeft voor CCS met vloeibaar transport hogere subsidie-intensiteiten weer omdat hier ook de kosten voor het vloeibaar maken van CO₂ zijn opgenomen in het basisbedrag. De wijzigingsnotitie van het PBL voor de SDE++ 2024 (PBL, 2023b) bevat een marktuitvraag naar verdere kostenontwikkelingen voor het vloeibaar maken en transporteren van CO₂. Deze kunnen eventueel worden meegenomen wanneer de ‘trechter’ wordt herzien. Op grond daarvan kan dan besloten worden om in de zeefstudie voor 2025 vloeibaar transport wel mee te nemen.

De ‘trechter’ zelf zal in de studie voor 2025 opnieuw worden geëvalueerd. De shortlist van de alternatieve technieken waarvan de subsidie-intensiteit moet worden bepaald kan daardoor volgend jaar anders zijn dan bovenstaande shortlist, evenals de lijst van fossiele referentietechnieken.

De vierde stap uit de methode, inbedding in breder beleid, wordt (voor 2024 en 2025) alleen uitgevoerd indien er alternatieven worden gevonden die qua kosteneffectiviteit dichtbij CCS zitten in termen van overlappende onzekerheidsmarges, zoals gespecificeerd in de zeefmethodiek (CE Delft, 2022)¹.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 presenteren we de gevolgde methodologie. We gaan eerst kort in op de algemene aanpak (Paragraaf 2.1) en de berekening van de subsidie-intensiteit en de gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 2.2).

Daarna geven we in Hoofdstuk 3 per proces de resultaten van de evaluatie van de subsidie-intensiteit voor de verschillende technieken (Paragraaf 3.1) en vergelijken we de resultaten voor de subsidieronde van 2024 globaal met die van 2023 (Paragraaf 3.2).

In Hoofdstuk 4 trekken we conclusies uit de gevonden resultaten. We beginnen met het antwoord op de hoofdvraag, namelijk of er op dit moment kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS (Paragraaf 4.1). Daarna vertalen we dit naar de conclusie op het niveau van de CCS-categorieën binnen de SDE++ (Paragraaf 4.2). Tot slot geven we een korte duiding van de resultaten in Paragraaf 4.3.

In Bijlage A wordt per techniek een verdere toelichting op de berekening gegeven.

¹ In de uitwerking voor 2023 werden er geen alternatieven gevonden die bijna net zo kosteneffectief waren als CCS (in termen van overlappende onzekerheidsmarges van de subsidie-intensiteit). De vierde stap is toen echter bij wijze van illustratie toch uitgevoerd voor CCS en een drietal alternatieve technieken. Dit is voor dit jaar niet opnieuw gedaan aangezien dat niet tot nieuwe inzichten zou leiden.

2 Methodologie

2.1 Algemene aanpak

Zoals hierboven aangegeven wordt in deze studie Stap 3 uit de zeefmethodiek van CE Delft (CE Delft, 2022) uitgevoerd voor de voor de SDE-2023-ronde gevonden shortlist van duurzame alternatieve technieken en fossiele referentietechnieken. Hieronder schetsen we een aantal kernpunten van de algemene aanpak. Voor details en achtergronden verwijzen we naar de zeefmethodiek zelf.

De kosteneffectiviteit (c.q. subsidie-intensiteit) wordt geëvalueerd door middel van het Onrendabele Top-model (OT-model) van het PBL. Voor de actualisatie van de zeefstudie hebben we de meest actuele data gebruikt van het OT-model voor de SDE-2024-ronde, dat we onder embargo van het PBL hebben ontvangen.

Binnen de zeefmethodiek wordt voor de te onderzoeken duurzame alternatieven gezocht naar technieken binnen het OT-model die hier zo veel mogelijk mee overeenkomen, maar er is niet altijd een 1-op-1-koppeling mogelijk. Ontbrekende data wordt aangevuld vanuit de literatuur. De subsidie-intensiteit wordt in onze aanpak dus zelfstandig berekend en niet gekopieerd uit het OT-model, maar wel volgens de rekenmethodiek van het model. Zie Bijlage A voor de rekenbladen van het OT-model waarop we onze berekening hebben gebaseerd en de aangepaste parameters per duurzaam alternatief.

We actualiseren ook twee onzekerheidsscenario's om de invloed van hogere/lagere kosten/prijzen/emissiefactoren te kunnen bepalen op de kosteneffectiviteit. De parameters voor de onzekerheidsscenario's staan weergegeven in Paragraaf 2.2.

2.2 Bepaling subsidie-intensiteit en gevoeligheidsanalyse

Binnen de SDE wordt voor de subsidie-intensiteit één waarde gehanteerd, zonder onzekerheidsmarge. Tijdens de ontwikkeling van de herziene zeefmethodiek is er echter voor gekozen² om wel een gevoeligheidsanalyse uit te voeren door middel van twee alternatieve scenario's, Laag en Hoog. Het Laag-scenario gaat uit van de meest gunstige aannames voor het businessmodel (voor alle onderzochte technieken) en bij het Hoog-scenario gaan we uit van de meest ongunstige aannames. Het Midden-scenario komt overeen met de nominale, berekende waarde van de subsidie-intensiteit. Er wordt voor de gevoeligheidsanalyse zowel naar interne als naar externe (marktgerelateerde) kosten gekeken. In Tabel 1 is weergegeven welke parameters worden gehanteerd voor de verschillende scenario's in deze studie.

De onzekerheid in de investeringskosten is afhankelijk van de volwassenheid van de techniek: hoe volwassener de techniek, hoe nauwkeuriger de investeringskosten ingeschat kunnen worden. Het Technology Readiness Level (TRL) van een techniek is gecombineerd met vijf klassen van kosteninschattingen zoals uiteengezet door de Association for the Advancement of Cost Engineering (AACE) (AACE International, 2020). Zie de herziene zeefmethodiek voor de exacte herkomst van de gebruikte parameters (CE Delft, 2022).

² In lijn met eerdere versies van de zeefmethodiek.

De gevoeligheidsanalyse is bedoeld om de intrinsieke onzekerheid in de kosteneffectiviteit van zowel de CCS-referentietechnieken als de duurzame alternatieven tot uitdrukking te brengen. Dit is vooral van belang vanuit beleidsoogpunt: het laat zien hoe gevoelig de bepaling van de subsidie-intensiteit is voor veranderingen in de parameters die worden gehanteerd. Ook is de bandbreedte die hierdoor ontstaat nuttig voor de vergelijking van de kosteneffectiviteit van de duurzame alternatieven en CCS volgens Stap 4 van de zeefmethodiek: het maakt inzichtelijk of de kosteneffectiviteit van de alternatieven al in de buurt komt van die van CCS of daar nog ver van verwijderd is.

In de resultaten geven we zowel de subsidie-intensiteit zelf (middenwaarde) als de waarden volgens het Laag- en Hoog-scenario. Binnen de SDE-methodiek voor het toekennen van subsidie speelt echter alleen de middenwaarde een rol.

Tabel 1 - Waarden van de parameters in de onzekerheidsscenario's

Categorie	Parameter	Eenheid	Laag	Midden	Hoog
Endogeen	Investeringskosten		TRL < 8: -35% TRL 8: -22% TRL 9: -15%	Nominale waarde	TRL < 8: +65% TRL 8: +35% TRL 9: +20%
	Vollasturen	Uur/jaar	8.760	8.000	6.200
Exogeen	Gasprijs	€/kWh _{LHV}	€ 0,029	€ 0,051	€ 0,062
	Elektriciteitsprijs	€/kWh	€ 0,064	€ 0,094	€ 0,120
	Waterstofprijs	€/kWh _{LHV}	€ 0,047	€ 0,077	€ 0,092
	CO ₂ -prijs	€/ton CO ₂	€ 109	€ 137	€ 186
	Emissiefactor elektriciteit	kg CO ₂ /kWh	0,087	0,130	0,260
	WACC			-25%	Nominale waarde

NB: De scenario's Laag/Midden/Hoog zijn intern en onderling consistent en worden als geheel per techniek toegepast. Het Laag-scenario resulteert daarbij niet altijd in de laagste subsidie-intensiteit omdat de verschillende factoren integraal doorwerken. Een voorbeeld: technieken op groengas hebben een hogere subsidie-intensiteit in het Laag-scenario dan in het Midden- en Hoog-scenario. Dit komt omdat deze technieken geen investeringskosten hebben en de opbrengst van de geproduceerde warmte met 44% daalt door de veel lagere gasprijs, terwijl de kosten van biomassa-reststromen als vast worden verondersteld.

3 Resultaten

3.1 Evaluatie kosteneffectiviteit per proces

3.1.1 Productie van LT/MT/HT-stoom

De aardgasgestookte boiler met post-combustion-CCS heeft een lagere subsidie intensiteit dan de duurzame alternatieven (zie Figuur 2). De subsidie-intensiteit van de aardgasgestookte boiler met post-combustion-CCS is 51/71/96 €/ton CO₂ voor het Laag/ Midden/ Hoog-scenario.

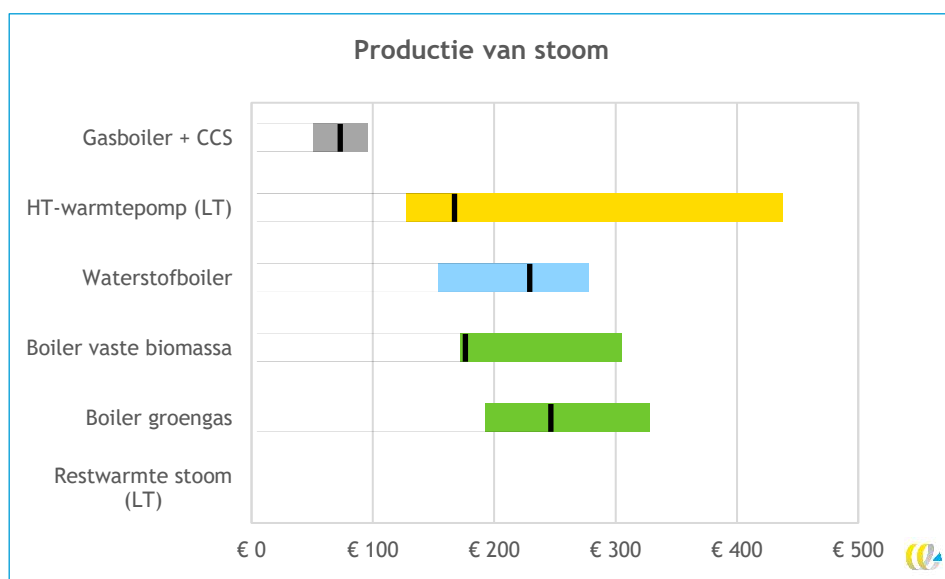
De **hogetemperatuurwarmtepomp** benut restwarmte uit het productieproces om lage-temperatuurstoom te genereren. In het Laag/Midden/Hoog-scenario bedraagt de subsidie-intensiteit van de HT-warmtepomp respectievelijk 128/165/438 €/ton CO₂. Net als de subsidie-intensiteit bandbreedte van de andere duurzame alternatieven ligt deze geheel boven de 100 €/ton CO₂. De aanzienlijke bandbreedte van de warmtepomp wordt veroorzaakt doordat in de onzekerheidsscenario's zowel de kosten van elektriciteit en aardgas als de emissie-intensiteit van de elektriciteit variëren. Hierdoor is onzekerheid zowel aanwezig in de kostprijs van de technologie als in de emissiereductie. Het verlagen van de middenwaarde is mogelijk door technologische ontwikkelingen en verdere vergroening van de elektriciteitsmix. Met name kan de bandbreedte worden verkleind als de variabiliteit in de raming van de resterende emissies van de elektriciteitssector afneemt, bijvoorbeeld door beleid gericht op een volledig CO₂-vrije elektriciteitsvoorziening.

De **waterstofboiler** is met een bandbreedte van 154/227/278 €/ton CO₂ duurder dan CCS.

De **boiler op vaste biomassa** heeft een subsidie-intensiteit van 172/174/305 €/ton CO₂. De middenwaarde is ongeveer twee keer zo hoog als de subsidie-intensiteit van CCS. De subsidie-intensiteit voor stoomproductie uit vaste biomassa is bepaald voor relatief dure houtpellets, omdat net als vorig jaar er geen SDE++-categorie bestaat voor stoomproductie uit andere typen biomassa zoals houtsnippers, B-hout of snoeiafval. Het gebruik van goedkopere typen biomassa voor stoomproductie zou de subsidie-intensiteit aanzienlijk kunnen verlagen, echter is het niet bekend wat het effect is op de overige kosten van zo'n installatie. Daarom is deze mogelijkheid niet doorberekend. Daarnaast is het aanbod van vaste biomassa zoals snoeiafval en B-hout hoogstwaarschijnlijk niet toereikend voor de schaal die nodig is om aardgasgestookte boilers te vervangen.

De **boiler op groengas** heeft een subsidie-intensiteit van 328/245/193 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario. De middenwaarde is de hoogste van alle duurzame alternatieven voor het proces van stoomproductie. Zoals in Paragraaf 2.2 besproken is de subsidie-intensiteit hoger in het Laag-scenario omdat de verwachte opbrengsten sterk dalen door een dalende gasprijs, terwijl de kosten nauwelijks dalen omdat de prijs van biomassa-reststromen als vast wordt verondersteld.

Figuur 2 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van stoom. De technieken gemarkeerd met (LT) zijn enkel toepasbaar voor de productie van laagtemperatuurstoom



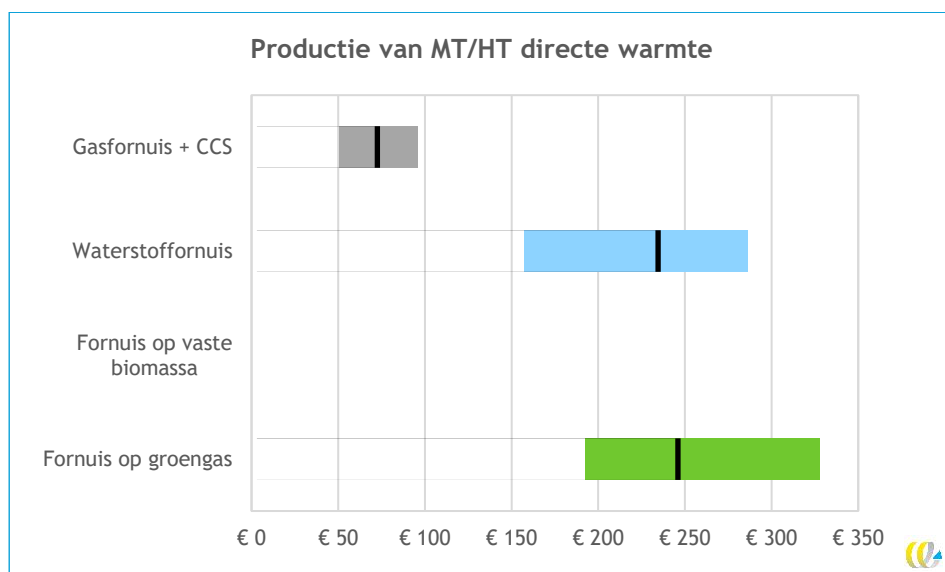
3.1.2 Productie van MT/HT directe warmte

Het aardgasgestookte procesfornuis met post-combustion-CCS heeft een lagere subsidie-intensiteit dan de duurzame alternatieven. De resultaten met betrekking tot productie van MT/HT directe warmte staan afgebeeld in Figuur 3.

De subsidie-intensiteit van het aardgasgestookte procesfornuis met post-combustion-CCS is 51/71/96 €/ton CO₂ voor het Laag/Midden/Hoog-scenario.

Het waterstoffornuis heeft een subsidie-intensiteit van 157/233/286 €/ton CO₂ voor het Laag/Midden/Hoog-scenario. In vergelijking met het CCS-gasfornuis is dit beduidend hoger.

Figuur 3 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van directe warmte



Data voor het **fornuis op vaste biomassa** staan niet afgebeeld in Figuur 3. Voor deze actualisatie is net als vorig jaar geen betrouwbare data gevonden.

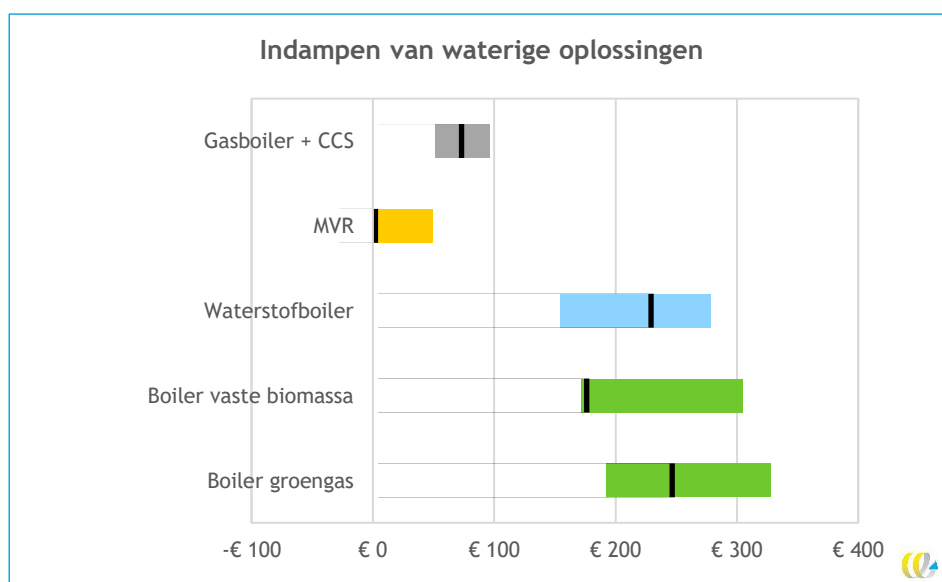
Het **fornuis op groengas** heeft een subsidie-intensiteit van 193/245/398 €/ton CO₂ voor het Laag/Midden/Hoog-scenario. Dit is nagenoeg identiek aan de andere alternatieven op groengas en daarmee fors hoger dan het fornuis of fossiele brandstoffen met CCS-techniek.

3.1.3 Indampen van waterige oplossingen

Het indampen van waterige oplossingen gebeurt met een meertrapsverdamper, aangedreven door stoom. Het is zowel mogelijk om de stoomproductie te verduurzamen als het proces zelf aan te passen. Mechanical Vapour Recompression (MVR), of **stoomrecompressie**, gebruikt reststoom uit de laatste trap van de verdamper. Normaliter wordt deze stoom afgeblazen naar de atmosfeer omdat deze niet verder nuttig ingezet kan worden. Met een MVR wordt de reststoom met een elektrische compressor weer op hoge druk en temperatuur gebracht, waardoor een gesloten lus ontstaat. De overige technieken voor het indampen van waterige oplossingen zijn hetzelfde als voor de productie van stoom, zie Paragraaf 3.1.1.

De MVR heeft met 17/-32/-8 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario de laagste subsidie-intensiteit van alle beschouwde technieken voor het indampen van oplossingen, zie Figuur 4. De subsidie-intensiteit van MVR is beduidend lager dan die van CCS. MVR is algemeen toepasbaar voor indampingsinstallaties en is dus een echt alternatief voor CCS. De MVR scoort met name goed door het hoge rendement: de MVR zit in het OT-model van de SDE++ als 'openluswarmtepomp' met een rendement van 1.400% geproduceerde stoom per eenheid gebruikte elektriciteit. Zie Paragraaf 3.2.4 voor meer duiding van dit getal.

Figuur 4 - Resultaten subsidie-intensiteit voor het indampen van waterige oplossingen



3.1.4 Compressie van gassen

Voor de compressie van gassen is de referentietechniek een compressor aangedreven door een tegendrukstoomturbine. Alternatieven voor de stoomturbine zijn niet door de voorselectie gekomen van de vorige zeefstudie en zijn dus daarom geen onderdeel van deze studie. De enige verduurzamingsopties richten zich op de verduurzaming van stoomproductie, waarvoor de resultaten in Paragraaf 3.1.1 staan.

3.1.5 Productie van waterstof

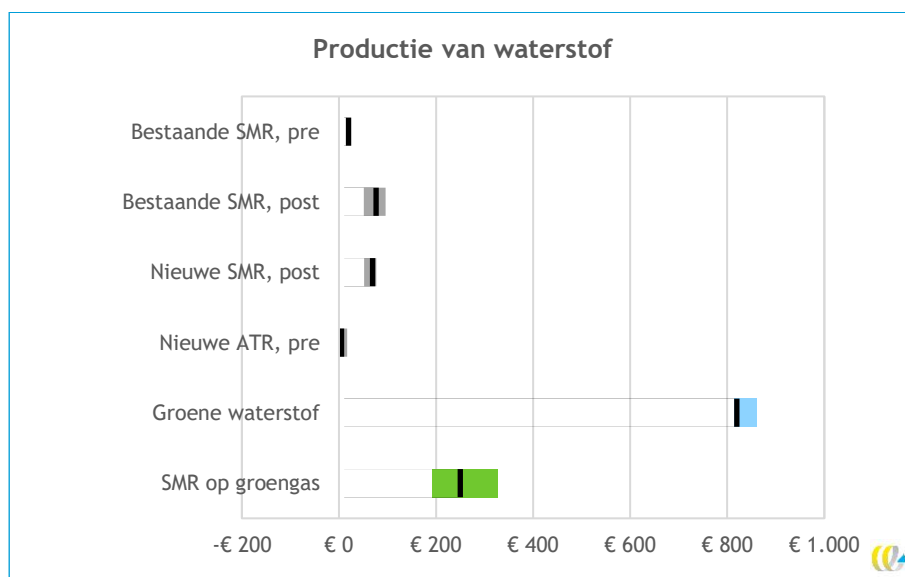
Voor de productie van waterstof is een bredere variëteit aan CCS-technieken behandeld. Deze zijn gecategoriseerd onder bestaande- en nieuwbouwstoomreformers (SMR), nieuwbouw autothermal reformers (ATR) en de productie van groene waterstof middels elektrolyse, gekoppeld aan wind- en zonne-energie.

Figuur 5 geeft de resultaten weer voor de productie van waterstof. De CCS-alternatieven resulteren in een fors lagere subsidie-intensiteit vergeleken met groene waterstof en de SMR op groengas. De CCS-alternatieven resulteren in een subsidie-intensiteit lager dan 100 €/ton CO₂ en voor waterstofproductie met een nieuwe ATR, pre-combustion-afvang is de subsidie-intensiteit zelfs negatief. Een negatieve subsidie-intensiteit geeft aan dat de kosten (c.q. basisbedrag) lager zijn dan de verwachte opbrengsten (langetermijncorrectiebedrag) en de verwachte subsidiebehoefte op termijn verdwijnt.

De productie van **groene waterstof** gaat gepaard met een subsidie-intensiteit van 849/814/860 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario. Met name de relatief hoge investeringskosten voor groene elektriciteitsopwekking en elektrolyzers dragen bij aan de hoge subsidie-intensiteit voor groene waterstofproductie.

De **SMR op groengas** is technisch identiek aan de SMR op aardgas, de meest gebruikte techniek voor de productie van waterstof. De gebruikte brandstoffen zijn gebaseerd op biomassa in plaats van op basis van fossiele brandstoffen. De SMR op groengas is fors duurder omdat de kosten voor de productie van groengas veel hoger zijn dan de marktprijs van aardgas.

Figuur 5 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van waterstof



3.2 Vergelijking met resultaten zeefstudie SDE++ 2023

3.2.1 Fossiele referentietechnieken

De subsidie-intensiteit van de fossiele referentietechnieken is in 2024 gedaald ten opzichte van het OT-model uit 2023 (zie Tabel 2). De subsidie-intensiteit wordt berekend met de formule (RVO, 2023):

$$\text{Subsidie intensiteit} = \frac{\text{basisbedrag} - \text{correctiebedrag}}{\text{netto vermeden emissies}}$$

De verklaring voor deze daling ligt in het feit dat de correctiebedragen voor de fossiele referentietechnieken in het Midden-scenario gemiddeld zijn toegenomen met 16% in het OT-model van 2024 ten opzichte van 2023, terwijl het basisbedrag (de kostprijs van de installatie) gemiddeld slechts met 2% is gestegen. De noemer in deze breuk, de netto vermeden emissies, is onveranderd gebleven. Voor de CCS-technieken zijn de verwachte opbrengsten direct verbonden met de langetermijn-CO₂-prijs, die in het OT-model van 2024 is gestegen ten opzichte van 2023. De langetermijnprijs van CO₂ bedroeg namelijk 118,93 €/ton CO₂ in 2023 en is in 2024 gestegen tot 137,38 €/ton CO₂. Door de hogere CO₂-prijs zijn de vermeden kosten gestegen, waardoor de techniek een lagere subsidie-intensiteit heeft.

Tabel 2 - Subsidie-intensiteit uit het Midden-scenario van de fossiele referentietechnieken in 2023 en 2024

Fossiele referentietechniek	Subsidie-intensiteit (€/ton CO ₂)		
	2023	2024	Vershil
1. Aardgasgestookte boiler met post-combustion-CO ₂ -afvang, gasvormig transport	88	71	-17
2. Aardgasgestookt procesfornuis met post-combustion-CO ₂ -afvang, gasvormig transport	88	71	-17
3. Bestaande SMR op aardgas, pre-combustion-CO ₂ -afvang, gasvormig transport	31	14	-17
4. Bestaande SMR op aardgas, post-combustion-CO ₂ -afvang, gasvormig transport	88	71	-17
5. Nieuwe SMR op aardgas, post-combustion-CO ₂ -afvang, gasvormig transport	64	46	-18
6. Nieuwe ATR op aardgas, pre-combustion-CO ₂ -afvang, gasvormig transport	8	-11	-19

3.2.2 Productie LT/MT/HT stoom

De **aardgasgestookte boiler met post-combustion-CCS** heeft ten opzichte van de studie voor 2023 nog steeds een lagere subsidie-intensiteit dan de duurzame alternatieven. De subsidie-intensiteit van de aardgasgestookte boiler met post-combustion-CCS valt 14/17/25 €/ton CO₂ lager uit, resulterend in 51/71/96 €/ton CO₂ voor het Laag/Midden/Hoog-scenario in 2024. Met name de hogere langetermijnprijs (c.q. langetermijnprijs CO₂) is daarbij een zwaarwegende factor. Dit duidt op een geringe toename van de kosten-effectiviteit vergeleken met het jaar 2023.

De **hogetemperatuurwarmtepomp** ziet een stijging van de subsidie-intensiteit ten opzichte van de studie voor 2023. In het Laag/Midden/Hoog-scenario is er sprake van een stijging van respectievelijk 3/4/22 €/ton CO₂ resulterend in 128/165/438 €/ton CO₂.

De **waterstofboiler** is nagenoeg onveranderd gebleven en daarmee even kosteneffectief gebleven vergeleken met vorig jaar.

De **boiler op vaste biomassa** is met respectievelijk 30/0/16 €/ton CO₂ toegenomen tot 172/174/305 €/ton CO₂ ten opzichte van 2023, wat duidt op een vermindering van de kosteneffectiviteit van deze techniek. Zowel in het Laag- als in het Hoog-scenario zorgt de relatief hogere kostprijs voor de installatie (i.e. het basisbedrag) voor een toename van de subsidie-intensiteit in 2024. Op basis van de vergelijking van de data uit het OT-model komt de verhoging van het basisbedrag mede door hogere vaste O&M-kosten voor de techniek in 2024 ten opzichte van het jaar ervoor.

De **boiler op groengas** resulteert in 296/238/203 €/ton CO₂ en 328/245/193 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario voor respectievelijk het jaar 2023 en 2024. De biomassa-prijs wordt als vast verondersteld terwijl de vaste O&M-kosten wel toenemen waardoor ook hier met name een stijging van het basisbedrag resulteert in een daling van de kosten-effectiviteit.

3.2.3 Productie MT/HT directe warmte

Het **aardgasgestookte procesfornuis** met post-combustion-CCS heeft ten opzichte van de studie voor 2023 nog steeds een lagere subsidie-intensiteit dan de duurzame alternatieven. De subsidie-intensiteit van de aardgasgestookte boiler met post-combustion-CCS valt 14/17/25 €/ton CO₂ lager uit, resulterend in 51/71/96 €/ton CO₂ voor het Laag/Midden/Hoog-scenario in 2024. De toename van de kosteneffectiviteit is toe te schrijven aan dezelfde reden als voor de **aardgasgestookte boiler met post-combustion-CCS**, zie Paragraaf 3.2.2.

Het **waterstoffornuis** is nagenoeg onveranderd gebleven en even kosteneffectief gebleven ten opzichte van vorig jaar. Het **procesfornuis op vaste biomassa** is niet behandeld vanwege een gebrek aan betrouwbare data.

Het **procesfornuis op groengas** gebruikt vergelijkbare technieken als de boiler op groengas. Hetzelfde verloop van de subsidie-intensiteit is hier te zien vergeleken met de andere technieken op groengas ten opzichte van vorig jaar.

3.2.4 Indampen van waterige oplossingen

Stoomrecompressie (MVR) is ten opzichte van de studie voor 2023 een stuk kosten-effectiever geworden. De subsidie-intensiteit van stoomrecompressie is in 2024 gedaald tot 17/-32/-8 €/ton CO₂ voor het Laag/Midden/Hoog-scenario ten opzichte van een subsidie-intensiteit van 45/24/98 €/ton CO₂ in 2023. Vooral het verschil in rendement met het jaar 2023 is opmerkelijk. Voor stoomrecompressie hanteert het OT-model 2023 een SPF-waarde (c.q. COP-waarde)³ van 7,0. Dit komt overeen met de COP-waarde zoals genoteerd in de MIDDEN-database uit 2021 (PBL, 2021). In het OT-model 2024 is de prestatiecoëfficiënt voor mechanische stoomrecompressie 14,0. In het OT-model is aangegeven dat deze waarde afkomstig is van een oordeel van experts. Wij hebben kunnen bevestigen dat de relatief hoge COP-waarde van een openluswarmtepomp (in een meertrapsverdampers) plausibel is⁴. Een meertrapsverdampers vergt namelijk in dergelijke toepassingen een relatief laagtemperatuurlift per trap waarbij de damp van de ene trap de vloeistof van de volgende kan verhitten. Daarmee wordt er minder stoom weggegooid en meer stoom nuttig ingezet. Dit leidt tot een verhoogd rendement.

³ SPF staat voor Seasonal Performance Factor en kwantificeert net als de COP (Coefficient of Performance) het rendement van een warmtepomp uitgedrukt in geleverde warmte gedeeld door het verbruik aan elektrische energie.

⁴ Persoonlijke communicatie Chris Jongmsma, oud-medewerker CE Delft

De toename in rendement resulteert in een toename van de geproduceerde eenheden warmte bij een gelijkblijvend verbruik aan elektrische energie. Het basisbedrag wordt hierdoor verlaagd en daarmee ook de subsidie-intensiteit die hiermee gepaard gaat. Dit resulteert in een verhoging van de kosteneffectiviteit voor MVR.

In het eindadvies voor de SDE++ 2023 werd gesteld dat voor openwarmtepompsystemen werd geadviseerd een maximale COP van 12,0 te hanteren. Hier is in het nieuwe OT-model van 2024 echter van afgeweken en is ervoor gekozen om een COP van 14,0 te hanteren. Voor de berekening van de subsidie-intensiteit van MVR is er daarom tevens voor gekozen om de COP van 14,0 te hanteren.

3.2.5 Productie van waterstof

Voor de productie van waterstof is een brede variëteit aan CCS-technieken behandeld. Deze zijn in beide studies gecategoriseerd onder bestaande- en nieuwbouw-SMR's, nieuwbouw-ATR's en de productie van groene waterstof middels elektrolyse.

Voor behandelde CCS-technieken zien we dat ze met maximaal 26 €/ton CO₂ dalen in subsidie-intensiteit ten opzichte van het jaar ervoor en daarmee kosteneffectiever worden.

Met afstand de grootste verschillen zien we aan de kant van de productie van **groene waterstof**. In 2023 bedroeg de subsidie-intensiteit bijna 800 €/ton CO₂, die met name veroorzaakt werd door de relatief hoge investeringskosten voor windmolens, zonnepanelen, elektrolyzers en randapparatuur. In 2024 bedraagt de subsidie-intensiteit gemiddeld ongeveer 840 €/ton CO₂. Evident een verlaging van de kosteneffectiviteit ten opzichte van het jaar 2023. Ook hier is de voornaamste stijging toe te wijzen aan een sterkere toename van het basisbedrag (i.e. de kostprijs van de installaties) ten opzichte van de verwachte opbrengsten (o.b.v. de langetermijnprijs).

4 Conclusie

4.1 Hoofdconclusie

In deze studie hebben we de zeef geactualiseerd voor de SDE-subsidieronde van 2024. Hierbij hebben we de methodiek aangehouden zoals gerapporteerd in onze herziene zeefmethodiek (CE Delft, 2022). De hoofdonderzoeksvraag luidt: Zijn er op dit moment aantoonbare duurzame kosteneffectieve alternatieven voor CCS?

Mechanische stoomrecompressie (MVR) is gevonden als duurzaam kosteneffectief alternatief voor CCS. Dit is een techniek die wordt gebruikt voor het indampen van waterige oplossingen. De subsidie-intensiteit resulteert in 1 €/ton CO₂ op basis van het OT-model. De aardgasgestookte stoomboiler met post-combustion-CCS resulteert in een subsidie-intensiteit van 71 €/ton CO₂ op basis van het OT-model.

De andere onderzochte technieken zijn op dit moment niet kosteneffectiever dan CCS.

4.2 Conclusie voor de CCS-gerelateerde categorieën van de SDE++

In onze benadering hebben we ervoor gekozen om ons te richten op industriële processen in plaats van specifieke technieken. Hierdoor krijgen we meer inzicht in duurzame alternatieven die beschikbaar zijn voor concrete processen. Aan de andere kant hanteert de SDE++ brede technieken (categorieën). Alleen een volledige SDE-categorie kan worden uitgesloten van subsidie, dus wanneer er een kosteneffectief alternatief wordt gevonden, kan subsidie alleen worden stopgezet als dit alternatief van toepassing is op een volledige SDE-categorie.

In het vorige hoofdstuk hebben we stoomrecompressie (MVR) geïdentificeerd als een kosteneffectief duurzaam alternatief voor CCS bij installaties die waterige oplossingen indampen. Dit proces moet terugvertaald worden naar een SDE-categorie om uitspraken te kunnen doen over het wel of niet uitsluiten van een SDE-categorie voor subsidie.

Bij het indampen van waterige oplossingen wordt een aardgasgestookte stoomboiler gebruikt. Als CCS wordt toegepast, worden de emissies in de schoorsteen van de boiler afgevangen. Dit valt onder categorie 5A in de SDE: post-combustion-afvang, gasvormig transport.

Post-combustion-afvang bij bestaande industriële installaties wordt echter op grote schaal toegepast, niet alleen bij het indampen van oplossingen. Sterker nog, in het vorige hoofdstuk hebben we diverse processen geïdentificeerd waar post-combustion-CCS het meest kosteneffectieve alternatief is. Het is dus niet zonder meer mogelijk om categorie 5A te sluiten, omdat er voor een specifiek proces (indampen) een duurzaam alternatief is gevonden.

Een alternatief voor het sluiten van een bestaande categorie zou kunnen zijn om een nieuwe categorie te creëren of af te splitsen van een bestaande categorie, die een specifiekere beschrijving van het proces bevat waarvoor geen subsidie meer wordt verstrekt voor CCS. Voor indampen is dit echter niet haalbaar, omdat het proces waarop CCS wordt toegepast de productie van stoom betreft, wat wederom een zeer algemeen proces is.

Daarom is het niet mogelijk om een SDE-categorie te identificeren of te creëren die uitsluitend betrekking heeft op de toepassing van CCS bij de productie van stoom voor het indampen van oplossingen. Het is dus niet mogelijk om CCS in deze toepassing uit te sluiten van subsidie op basis van de zeef. Dit sluit aan bij de conclusie van de zeefstudie van vorig jaar voor de SDE+-ronde 2023.

4.3 Duiding van de resultaten

Opvallend aan de resultaten van de zeef voor 2024 ten opzichte van die voor 2023, is dat de subsidie-intensiteiten van de CCS-referentietechnieken over het algemeen omlaag zijn gegaan. De reden hiervoor is dat voor al deze technieken de verwachte opbrengsten (i.e. langetermijnprijs) relatief harder zijn gestegen dan de basisbedragen, namelijk 16% tegenover slechts gemiddeld 2% kostenstijging. De SDE++ vergoedt het verschil in kostprijs en verwachte opbrengsten, wat door een grotere toename van de verwachte opbrengsten dus resulteert in een lagere subsidie-intensiteit. De toename van verwachte opbrengsten, ook wel de (verwachting van) vermeden kosten, is voor de CCS-technieken uitsluitend gerelateerd aan de langetermijn-CO₂-prijs die met 16% is toegenomen ten opzichte van het OT-model 2023.

De subsidie-intensiteiten voor de duurzame alternatieve technieken zijn over het algemeen juist toegenomen. Dit heeft te maken met de stijging van het basisbedrag, terwijl – anders dan bij de CCS-technieken – in het OT-model geen gestegen opbrengsten zijn verwacht. Het gaat hierbij om een stijging in de kosten van grondstoffen, energie, O&M- en investeringskosten. Het verschil in subsidie-intensiteit tussen de alternatieven en de CCS-technieken is daarmee toegenomen. Qua kosteneffectiviteit zijn de alternatieve technieken daardoor verder van CCS verwijderd geraakt. Vanuit het oogpunt van verduurzaming van de industrie is dit geen gunstige ontwikkeling. CCS met fossiele CO₂ wordt immers beschouwd als een tijdelijke oplossing om de emissiereductiedoelstellingen voor de industrie in 2030 te halen. Op lange termijn zouden de productieprocessen zelf verduurzaamd moeten worden op basis van de onderzochte alternatieven. Hoge kosten vormen hiervoor nu mogelijk een belemmering.

Bronnen

- CE Delft. (2022). *Herziening zeefmethodiek CCS voor SDE++*. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2023/05/CE_Delft_220347_Herziening_zeefmethodiek_CCS_voor_SDE_Def.pdf
- CE Delft. (2023). *Kosteneffectieve alternatieven voor CCS. Uitwerking van de 'zeef' ten bate van de SDE++-subsidieronde voor 2023*.
- PBL. (2021). *MIDDEN database*. <https://www.pbl.nl/en/middenweb/the-database>
- PBL. (2022). *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022*. <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2022>
- PBL. (2023a). *Eindadvies basisbedragen SDE++ 2023*. <https://www.pbl.nl/publicaties/eindadvies-basisbedragen-sde-2023>
- PBL. (2023b). *Wijzigingsnotitie SDE++ 2024*. <https://www.pbl.nl/publicaties/wijzigingennotitie-sde-2024>
- Rijksoverheid. (2019). *Klimaatakkoord*.
- RVO. (2023). *SDE++ 2023 - Openstelling 2023*. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2023-07/BrochureSDE2023.pdf>

A Uitwerking technieken

A.1 CCS-technieken

Voor de CCS-technieken in de zeefstudie zijn de sheets gebruikt uit het OT-model 2024 dat onder embargo aan CE Delft is verstrekt vanuit het PBL. Deze staan weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 - Koppeling CCS-technieken in de zeefstudie en categorieën in OT-model van 2024

CCS-techniek	Relevante sheet in OT-model 2024
Gasgestookte stoomboiler met CCS	CCS - Nieuwe post-combustion-CO ₂ -afvang, bestaande industriële installatie, gasvormig transport (variant 5A)
Gasgestookt procesfornuis met CCS	
Bestaande SMR, pre-combustion-afvang	CCS - Nieuwe pre-combustion-CO ₂ -afvang, bestaande installatie, gasvormig transport (variant 3A)
Bestaande SMR, post-combustion-afvang	CCS - Nieuwe post-combustion-CO ₂ -afvang, bestaande industriële installatie, gasvormig transport (variant 5A)
Nieuwe SMR, post-combustion-afvang	CCS - Nieuwe post-combustion-CO ₂ -afvang, nieuwe installatie, gasvormig transport (variant 8A)
Nieuwe ATR, pre-combustion-afvang	CCS - Nieuwe pre-combustion-CO ₂ -afvang, nieuwe installatie, gasvormig transport (variant 7A)

De variabele kosten voor de CCS-technieken zijn opgebouwd uit de verwerkingskosten voor transport en opslag van CO₂, de energiekosten en kosten voor gebruikte chemicaliën (kosten voor solvents) bij het afvangen van CO₂. De zeefstudie die is uitgevoerd voor 2023 heeft het OT-model uit 2022 als basis gebruikt om de solventkosten te bepalen. De totale variabele O&M-kosten zijn hierbij verminderd met de verwerkingskosten voor CO₂ en de energiekosten. Tabel 4 toont de waardes die corresponderen met de variabele O&M-kosten (Midden-scenario) voor CCS-technieken in 2023.

Tabel 4 - Variabele O&M-kosten voor het Midden-scenario van de CCS-technieken 2023

	Variabele O&M totaal (€/ton CO ₂)	Verwerkings- toeslag (€/ton CO ₂)	Energie- kosten (€/ton CO ₂)	Kosten voor solvent (€/ton CO ₂)
SMR, post (5A)	€ 120,81	€ 71,80	€ 46,02	€ 2,99
SMR, pre (3A)	€ 104,66	€ 71,80	€ 29,96	€ 2,91
ATR, pre (7A)	€ 100,94	€ 71,80	€ 28,74	€ 0,40

De energiekosten zijn bepaald aan de hand van de sommatie van het energieverbruik per techniek en de langetermijnprijzen voor elektriciteit en warmte uit het OT-model.

De verwerkingstoeslag voor CO₂ bedroeg 71,80 €/ton in 2023 (PBL, 2023a), uitgaande van 8.000 uur per jaar. In de wijzigingsnotitie SDE++ 2024 wordt aangegeven dat er op basis van de aanvragen voor de SDE++ er op dit moment geen concrete wijzigingen worden verwacht ten behoeve van de kostenparameters voor het eindadvies SDE++ 2024 (PBL, 2023b).

In 2024 hebben we daarom de verwerkingstoelage onveranderd gelaten en veranderingen in de totale variabele O&M-kosten opgevangen met de kosten voor chemicaliën (i.e. solvent-kosten) zodat de variabele O&M uitkomt op het bedrag in het OT-model uit 2024, zie Tabel 5.

Tabel 5 - Variabele O&M-kosten voor het Midden-scenario van de CCS-technieken 2024

	Variabele O&M totaal (€/ton CO ₂)	Verwerkings- toeslag (€/ton CO ₂)	Energie- kosten (€/ton CO ₂)	Kosten voor solvent (€/ton CO ₂)
SMR, post (5A)	€ 124,10	€ 71,80	€ 47,43	€ 4,88
SMR, pre (3A)	€ 107,60	€ 71,80	€ 30,91	€ 4,89
ATR, pre (7A)	€ 101,80	€ 71,80	€ 29,66	€ 0,33

A.2 Hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie

Voor de hogetemperatuurwarmtepomp is het blad ‘Industriële warmtepomp, gesloten systeem (8.000 uur)’ van het OT-model 2024 als uitgangspunt genomen. We bespreken hieronder welke parameters zijn aangepast om de subsidie-intensiteit te berekenen voor de hogetemperatuurwarmtepomp.

De berekeningswijze voor het correctiebedrag is gelijk gehouden ten opzichte van de berekening van de vorige zeefstudie die iets afwijkt van de waarde zoals die in het OT-model staat voor het blad van de industriële warmtepomp. Hierbij is het correctiebedrag 90% van de langetermijngasprijs op basis van de Lower Heating Value (LHV).

In het OT-model 2024 voor de ‘Industriële warmtepomp, gesloten systeem (8.000 uur)’ staat deze op 70% van de langetermijngasprijs, maar is dus aangepast naar 90% voor de hogetemperatuurwarmtepomp.

Het vermogen dat de warmtepomp levert is gelijk aan de waarde die in de studie voor 2023 is aangenomen. Hierdoor is het inputvermogen berekend op basis van de COP-waarde van 3,5 zoals vermeld in het OT-model van 2024. De overige aangepaste parameters, investeringskosten, vaste O&M-kosten en relatief elektriciteitsgebruik, zijn overgenomen uit het rapport van vorig jaar, welke staan vermeld in Tabel 6.

Tabel 6 - Parameters OT-model voor het Midden-scenario van de hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Inputvermogen	350	kW _{th}	Berekend o.b.v. COP
Outputvermogen (thermisch of hernieuwbaar gas)	1.000	kW _{th}	Aanname
Investeringskosten output gebaseerd	1.681	€/kW _{output}	Kosteneffectieve alternatieven voor CCS (CE Delft, 2023)
Vaste O&M-kosten output gebaseerd	89,6	€/kW/jaar	Kosteneffectieve alternatieven voor CCS (CE Delft, 2023)
Relatief elektriciteitsgebruik	0,337	kWh/kWh	Kosteneffectieve alternatieven voor CCS (CE Delft, 2023)

A.3 Waterstofboiler

De kosten van de waterstofboiler zijn gebaseerd op de kosten voor een retrofit, zoals te vinden in de MIDDEN-database (TC0474 - Hydrogen boiler).

Tabel 7 - Parameters OT-model voor het Midden-scenario van de waterstofboiler voor LT/MT/HT-stoom en het indampen van waterige oplossingen

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Productie-eenheid	-	kWh	
Vermogenseenheid	-	kW	
Berekeningswijze correctiebedrag methode-ID	18	-	
Inputvermogen	1.111	kW _{th}	90% LHV-rendement (MIDDEN)
Outputvermogen (thermisch of hernieuwbaar gas)	1.000	kW _{th}	Aanname
Investeringskosten output gebaseerd	140	€/kW	MIDDEN
Vaste O&M-kosten output gebaseerd	17,5	€/kW/jaar	MIDDEN
Emissiefactor - Productie van warmte of overig	0,225	kg CO ₂ /kWh	
Rendement op vreemd vermogen	2,7%	%	Notitie uitgangspunten
Rendement op eigen vermogen	13%	%	Notitie uitgangspunten
Aandeel eigen vermogen in investering	30%	%	Notitie uitgangspunten
Vennootschapsbelasting	25,8%	%	Notitie uitgangspunten
Economische levensduur	12	jaar	Notitie uitgangspunten
Termijn lening	12	jaar	Notitie uitgangspunten
Afschrijvingstermijn	12	jaar	Notitie uitgangspunten
Beleidsperiode	12	jaar	Notitie uitgangspunten

A.4 Boiler op vaste biomassa

Voor de boiler op vaste biomassa is het blad 'Ketel stoom uit houtpellets 5-50 MWth' uit het OT-model 2024 genomen als uitgangspunt. Er zijn geen afwijkende parameters gebruikt ten opzichte van de standaardwaarden uit het OT-model 2024 voor deze SDE-categorie. Voor de doorberekening van de scenario's Laag/Midden/Hoog zijn er wel enkele parameters variabel gemaakt, zoals de prijs van houtpellets met behulp van de biomasprijs uit de SDE++ 2023 en data uit het KEV 2022 (PBL, 2022, 2023a).

A.5 Toepassing van groengas

Er is geen SDE++-categorie voor het gebruik van groengas. Voor het gebruik van groengas zijn geen additionele investerings- of onderhoudskosten nodig, aangezien het gas chemisch identiek is aan aardgas. Het enige verschil zit in de kostenraming.

De kosten modelleren we aan de hand van de mediaan van de subsidie-intensiteit van alle categorieën die hernieuwbaar gas produceren (alle technieken met Methode-ID 13):

- Groengas uit biomassa (>95% biogeen);
- Groengas uit biomassa (B-hout);
- Groengas uit afval;
- Monomest 110-450 kW - Hernieuwbaar gas (HG);
- Monomest < 110 kW - Hernieuwbaar gas (HG);
- Monomest > 450 kW - Hernieuwbaar gas (HG);
- Allesvergisting - Hernieuwbaar gas (HG);
- Verbeterde slibgisting - Hernieuwbaar gas (HG);



- Levensduurverlenging allesvergisting - Hernieuwbaar gas (HG);
- Levensduurverlenging allesvergisting - ombouw naar Hernieuwbaar gas (HG);
- Levensduur verlenging Monomest 110 - 450 kW - Hernieuwbaar gas (HG);
- Levensduur verlenging Monomest 110 - 450 kW - ombouw naar Hernieuwbaar gas (HG).

We verwachten dat de mediaan het gewogen gemiddelde van de daadwerkelijke productiemix van groengas het meest nauwkeurig benaderd.

We hebben gekozen om de kosten voor de productie van groengas door te rekenen en niet uit te gaan van de langetermijnprijs van gas. Groengas is schaars en al het geproduceerde groengas wordt vandaag al gebruikt. Het is dus nodig om extra groengas te produceren voor het nieuwe verbruik. Anders treedt er namelijk geen CO₂-reductie op, maar wordt het gas alleen anders gealloceerd. De CO₂-reductie van de productie van groengas is hoger dan enkel het vervangen van aardgas, dit rekenen we door aan de inzet van het groengas.

A.6 Restwarmtestoom

Voor de levering van restwarmte in de vorm van stoom nemen we een vaste subsidie-intensiteit van 0 €/ton CO₂ aan. Levering van stoom is namelijk uitgesloten van de SDE++ omdat er geen onrendabele top is (RVO, 2023).⁵

A.7 Procesfornuis op waterstof

In de zeefstudie voor 2023 is voor het procesfornuis op waterstof de MIDDEN-database als uitgangspunt beschouwd. De kosten van het waterstoffornuis zijn gebaseerd op de kosten voor een retrofit (TC0450 - Hydrogen thermal oil heater, retrofit) aangevuld met data uit het OT-model, zie Tabel 8.

Tabel 8 - Parameters OT-model voor het Midden-scenario van het procesfornuis op waterstof voor LT/MT/HT-stoom en het indampen van waterige oplossingen

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Productie-eenheid	-	kWh	
Vermogenseenheid	-	kW	
Berekeningswijze correctiebedrag methode-ID	18	-	
Inputvermogen	1.124	kW _{th}	89% LHV-rendement (MIDDEN)
Outputvermogen (thermisch of hernieuwbaar gas)	1.000	kW _{th}	Aanname
Investeringskosten output gebaseerd	246	€/kW	MIDDEN
Vaste O&M-kosten output gebaseerd	8,16	€/kW/jaar	MIDDEN
Emissiefactor - Productie van warmte of overig	0,225	kg CO ₂ /kWh	
Rendement op vreemd vermogen	2,7%	%	Notitie uitgangspunten
Rendement op eigen vermogen	14,5%	%	Notitie uitgangspunten
Aandeel eigen vermogen in investering	30%	%	Notitie uitgangspunten
Vennootschapsbelasting	25,8%	%	Notitie uitgangspunten
Economische levensduur	12	jaar	Notitie uitgangspunten
Termijn lening	12	jaar	Notitie uitgangspunten
Afschrijvingstermijn	12	jaar	Notitie uitgangspunten
Beleidsperiode	12	jaar	Notitie uitgangspunten

⁵ De brochure van SDE++ 2023 vermeldt bij restwarmtebenutting: "Levering van stoom is hiervan uitgesloten, omdat dit geen onrendabele top heeft."



A.8 Procesfornuis op vaste biomassa

Voor het procesfornuis op vaste biomassa is in deze actualisatie studie geen data gevonden. De MIDDEN-database van het PBL bevat geen mogelijke duurzame alternatieven met betrekking tot procesfornuizen op vaste biomassa (PBL, 2021). Aanvullend zoekwerk naar relevante datasheets leverde geen betrouwbare bronnen op. In deze studie is hierop daarom niet verder geëvalueerd.

A.9 Mechanical Vapour Recompression (MVR)

Voor de MVR nemen we het blad 'Industriële warmtepomp, open systeem (8.000 uur)' van het OT-model als uitgangspunt. We hebben geen afwijkende parameters gehanteerd ten opzichte van de standaardwaarden uit het OT-model voor deze SDE-categorie. Wel zijn enkele parameters variabel gemaakt aan de hand van de geformuleerde uitgangspunten in de aanpak van de zeefstudie.

A.10 Productie van groene waterstof

In de SDE++ 2024 wordt er onderscheid gemaakt tussen vijf afzonderlijke categorieën als het gaat om de productie van groene waterstof:

- waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met windpark, 25% vermogensverhouding;
- waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met zonnepark, 10% vermogensverhouding;
- waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met wind + zonnepark met cablepooling, 50% vermogensverhouding;
- waterstofproductie via elektrolyse, netgekoppeld;
- waterstofproductie via elektrolyse, netgekoppeld met PPA met windpark op zee.

Alle categorieën hebben een subsidie-intensiteit die met afstand groter is vergeleken met de CCS-technieken. Voor deze actualisatie is de SDE-categorie "*Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met wind + zonnepark met cablepooling, 50% vermogensverhouding*" als uitgangspunt genomen. Deze heeft met 814 €/ton CO₂ de laagste subsidie-intensiteit van de waterstofproductie technieken die de afgetopte subsidie-intensiteit van 400 €/ton CO₂ relatief ver overschrijdt.

We hebben geen afwijkende parameters gehanteerd ten opzichte van de standaardwaarden uit het OT-model 2024 voor deze SDE-categorie. Wel noemenswaardig: Enkele parameters zijn weliswaar variabel gemaakt aan de hand van de onzekerheidsmarges beschreven in Tabel 1. Dit heeft enkel invloed op het Laag- en Hoog-scenario zodat een representatieve weergave ontstaat voor de (vaste) O&M- en investeringskosten parameters in een specifiek scenario.