



Actualisatie zeefstudie voor SDE++-subsidieronde 2025

Kosteneffectieve alternatieven voor CCS



Committed to the Environment

Actualisatie zeefstudie voor SDE++-subsidieronde 2025

Kosteneffectieve alternatieven voor CCS

Dit rapport is geschreven door:

Maarten de Vries, Charley Bakker, Koen van Dam, Kris Manna

Delft, CE Delft, december 2024

Publicatienummer: 24.230441.175

Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

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	4
1	Inleiding	7
	1.1 Aanleiding	7
	1.2 Doel	7
	1.3 Methode	8
	1.4 Belangrijke wijzigingen ten opzichte van zeefstudie 2024	9
	1.5 Leeswijzer	11
2	De trechter: identificatie relevante processen en alternatieve technieken	12
	2.1 Inleiding	12
	2.2 Stap 0: Processen waarbij CCS potentieel een rol speelt	12
	2.3 Stap 1: Longlist van alternatieve technieken per proces	18
	2.4 Stap 2: Shortlist van alternatieve technieken	20
3	De zeef: evaluatie kosteneffectiviteit	22
	3.1 Inleiding	22
	3.2 Bepaling subsidie-intensiteit en gevoeligheidsanalyse	22
	3.3 Resultaten per proces	24
	3.4 Conclusies	30
4	Inbedding in breder beleid	32
	4.1 Inleiding	32
	4.2 Selectie van kansrijke alternatieven	32
	4.3 Nadere analyse van overige (beleids)aspecten	33
	4.4 Toelichting bij de analyse van beleidsaspecten	35
5	Conclusies	40
	5.1 Hoofdconclusie	40
	5.2 Beschouwing op de resultaten	40
	Literatuurlijst	43
	Longlist bedrijven	45
A	Verdere uitwerking uitsluitingsgronden	49
	A.1 Onvermijdbare procesemissies	49
	A.2 Biogene uitstoot	49
	A.3 Elektriciteitsopwekking	49
	A.4 Staalproductie	50
	A.5 Afvalverbranding en overige verwerking afval	50
	A.6 Glastuinbouw	50



A.7	Overige uitgesloten sectoren	50
B	Uitwerking technieken	52
B.1	CCS-technieken	52
B.2	HT-warmtepomp voor stoomproductie	53
B.3	Restwarmtestoom	54
B.4	Waterstoftechnieken	54
B.5	Groengastechnieken	56
B.6	Procesfornuis op vaste biomassa	57
B.7	Mechanical Vapour Recompression (MVR)	57
B.8	Iron Fuel Technology (RIFT)	57

Samenvatting

Aanleiding en doel

In het Nederlandse Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019) is afgesproken dat subsidiëring van Carbon Capture and Storage (CCS) van CO₂ van fossiele oorsprong niet ten koste mag gaan van de ontwikkeling van alternatieve, schone energietechnieken. Daarom is subsidiëring van CCS-projecten via de SDE++ ingekaderd, onder andere via de zogenoemde 'zeef'. Met de zeef wordt per relevant industrieel proces gekeken of er aantoonbare kosteneffectieve, alternatieve technieken bestaan voor CCS, die binnen dezelfde termijn gerealiseerd kunnen worden.

De SDE++ werkt met categorieën die elk een bepaalde techniek vertegenwoordigen.

Als er voor één van de SDE++-categorieën voor CCS kosteneffectieve alternatieven worden geïdentificeerd voor alle industriële processen waarop die categorie van toepassing is, dan kan de betreffende SDE++-categorie uitgesloten worden van subsidie.

De zeef wordt door CE Delft uitgevoerd op basis van de in 2022 ontwikkelde methodiek (CE Delft, 2022a), waarbij we gebruik maken van de subsidie-intensiteiten van de verschillende technieken volgens het Onrendabele Top (OT)-model van PBL. In deze studie is de zeef uitgevoerd voor de SDE++-ronde van 2025.

Hoofdconclusie

We concluderen dat op basis van de zeef **geen SDE++-categorie voor CCS kan worden uitgesloten van subsidie in 2025**. Hoewel voor veel industriële processen een kosteneffectief duurzaam alternatief is gevonden, is er voor elke categorie ook minimaal één proces waarvoor dit niet zo is. Daarom kan er niet een gehele categorie worden uitgesloten.

Belangrijke wijzigingen ten opzichte van de zeefstudie 2024

Dit jaar is de **zeefmethodiek weer volledig uitgevoerd**. In de studie van vorig jaar, voor de subsidieronde van 2024, werd alleen de kosteneffectiviteit van de alternatieve technieken opnieuw berekend, maar werd voor de selectie van alternatieve technieken de lijst van het jaar daarvoor aangehouden. Dit jaar hebben we opnieuw gekeken naar de selectie van relevante sectoren, de processen daarbinnen en de potentiële alternatieve duurzame technieken. Dit heeft ertoe geleid dat we één nieuwe techniek hebben toegevoegd aan de lijst van duurzame alternatieven, namelijk Reduced Iron Fuel Technology (RIFT).

Een andere wijziging ten opzichte van de studie van vorig jaar is dat **de berekening van de subsidie-intensiteit in het OT-model is veranderd**. Waar vorig jaar de ETS-opbrengsten (de vermeden ETS-kosten als er geen CO₂ meer wordt uitgestoten) alleen voor de CCS-technieken waren meegenomen in de berekening van de subsidie-intensiteit, is dat nu ook voor de alternatieve duurzame technieken gebeurd. Hiermee zijn de subsidie-intensiteiten beter vergelijkbaar dan in eerdere versies van het OT-model. Dit is terug te zien in de resultaten, doordat de kosteneffectiviteit van veel alternatieve technieken nu veel dichterbij die van CCS ligt dan in de zeefstudies van eerdere jaren.

Resultaten

We hebben de kosteneffectiviteit van verschillende vormen van CCS en de relevante duurzame alternatieve technieken vergeleken per industrieel proces. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 - Resultaten vergelijking kosteneffectiviteit CCS en duurzame, alternatieve technieken per proces

Proces	Fossiele referentietechniek	SDE++-categorie CCS*	Kosteneffectief duurzaam alternatief
Productie van LT-stoom	Gasboiler + CCS (gas)	Variant 5A	HT-warmtepomp
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	HT-warmtepomp Waterstofboiler
Productie van MT/HT-stoom	Gasboiler + CCS (gas)	Variant 5A	-
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	Waterstofboiler
Productie van MT/HT directe warmte	Gasfornuis + CCS (gas)	Variant 5A	Waterstoffornuis
	Gasfornuis + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	Waterstoffornuis
Indampen van waterige oplossingen	Gasboiler + CCS (gas)	Variant 5A	Mechanical Vapour Recompression (MVR)
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	Mechanical Vapour Recompression (MVR), waterstofboiler
Productie van waterstof**	Bestaande SMR, pre + CCS (gas)	Variant 3A	-
	Bestaande SMR, pre + CCS (vloeibaar)	Variant 3B	-
	Bestaande SMR, post + CCS (gas)	Variant 5A	-
	Bestaande SMR, post + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	-
	Nieuwe SMR, post + CCS (gas)	Variant 8A	-
	Nieuwe SMR, post + CCS (vloeibaar)	Variant 8B	-
	Nieuwe ATR, pre + CCS (gas)	Variant 7A	-
	Nieuwe ATR, pre + CCS (vloeibaar)	Variant 7B	-
	Bestaande ATR, pre + CCS (gas)	Variant 3A	-
	Bestaande ATR, pre + CCS (vloeibaar)	Variant 3B	-

* Uitleg CCS-categorieën:

Variant 3A: Nieuwe pre-combustion-CO₂-afvang, bestaande installaties, gasvormig transport.

Variant 3B: Nieuwe pre-combustion-CO₂-afvang, bestaande installaties, vloeibaar transport.

Variant 5A: Nieuwe post-combustion-CO₂-afvang, bestaande industriële installatie, gasvormig transport.

Variant 5B: Nieuwe post-combustion-CO₂-afvang, bestaande industriële installatie, vloeibaar transport.

Variant 7A: Nieuwe pre-combustion-CO₂-afvang, nieuwe installatie, gasvormig transport.

Variant 7B: Nieuwe pre-combustion-CO₂-afvang, nieuwe installatie, vloeibaar transport.

Variant 8A: Nieuwe post-combustion-CO₂-afvang, nieuwe installatie, gasvormig transport.

Variant 8B: Nieuwe post-combustion-CO₂-afvang, nieuwe installatie, vloeibaar transport.

** De verwijzing naar bestaande/nieuwe ATR of SMR is conform de referentie-installatie die het PBL hanteert in het Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2024 (PBL, 2024).

Uit deze resultaten concluderen we dat **voor de meeste processen die we in deze studie hebben onderzocht, een kosteneffectief duurzaam alternatief beschikbaar is**. Dit geldt alleen niet voor de productie van MT-/HT-stoom (ten opzichte van gasvormige CCS) en voor de productie van waterstof. Om die reden kunnen ook de SDE++-categorieën 5A en 5B op basis van de zeef niet uitgesloten worden van subsidie. Dit kan immers alleen als voor alle toepassingen van de SDE++-categorie een kosteneffectief duurzaam alternatief bestaat.

Duiding van de resultaten

Hoewel de hoofdconclusie is dat er ook in 2025 geen SDE++-categorie voor CCS kan worden uitgesloten van subsidie op basis van de zeef, zien we dit jaar dat er voor veel processen wel degelijk een kosteneffectief alternatief in zicht is. **Dit is een ander beeld dan in de vorige zeefstudie, voor 2024**. Dit wordt grotendeels veroorzaakt door de wijziging in de berekening van de subsidie-intensiteit, zoals hierboven is uitgelegd; niet door verandering van de kosten van de technieken.

Daarnaast is duidelijk geworden dat, zolang er voor de productie van MT-/HT-stoom en van waterstof geen kosteneffectief alternatief beschikbaar is, er volgens de huidige methode nooit een SDE++-categorie voor CCS op basis van de zeef van subsidie kan worden uitgesloten. Daarbij is vooral voor de productie van waterstof geen kosteneffectief alternatief in zicht.

Het is daarmee de vraag **hoe zinvol het is om de zeefstudie op deze manier jaarlijks te herhalen**. Deze vraag nemen we graag mee in een nadere herziening van de zeef-methodiek. Er kan bijvoorbeeld gekeken kunnen worden of er binnen een CCS-categorie toch bepaalde routes kunnen worden uitgesloten.

We hebben voor een selectie van veelbelovende duurzame, alternatieve technieken een nadere analyse van relevante beleidsaspecten (anders dan kosteneffectiviteit) uitgevoerd. Ook andere aspecten, zoals de beschikbaarheid van infrastructuur of negatieve milieueffecten, bepalen immers of een duurzame techniek in de praktijk echt een alternatief voor CCS vormt. **Belangrijke knelpunten die hieruit naar voren komen** zijn netcongestie voor de HT-warmtepomp, beperkte beschikbaarheid van duurzame biomassa voor groengas en mogelijke importafhankelijkheden voor groene waterstof.

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 (Rijksoverheid, 2019) is afgesproken dat subsidiëring van Carbon Capture and Storage (CCS) van CO₂ van fossiele oorsprong niet ten koste mag gaan van de ontwikkeling van alternatieve, schone energietechnieken. Daarom is subsidiëring van CCS-projecten via de SDE++ ingekaderd, onder andere via de zogenoemde 'zeef'. De zeef houdt in dat er per relevant industrieel proces gekeken wordt of er aantoonbare kosteneffectieve alternatieve technieken bestaan voor CCS die binnen dezelfde termijn kunnen worden gerealiseerd. Als die er zijn, wordt CCS volgens de afspraken in het Klimaatakkoord niet gesubsidieerd. 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 Economische Zaken en Klimaat de methodiek om de zeef toe te passen herzien (CE Delft, 2022a) en sindsdien uitgewerkt voor de subsidieronde van 2023 (CE Delft, 2023b) en 2024 (CE Delft, 2024). In deze studie wordt de zeef toegepast voor de SDE++-ronde van 2025, op basis van dezelfde methode.

1.2 Doel

Het hoofddoel van deze studie is **om te bepalen of er een SDE++-categorie voor CCS uitgesloten zou kunnen worden van de SDE++-subsidieronde van 2025 op basis van de zeef.**

Dat betekent dat er volgens onze zeefmethodiek kosteneffectieve alternatieven worden geïdentificeerd voor de betreffende CCS-categorie. De SDE++ werkt met categorieën die elk een bepaalde techniek vertegenwoordigen. Als er voor één van de SDE++-categorieën voor CCS kosteneffectieve alternatieven worden geïdentificeerd voor alle industriële processen waarvoor die categorie van toepassing is, dan kan de betreffende SDE++-categorie uitgesloten worden van subsidie.

De beslissing om een SDE++-categorie uit te sluiten van subsidie is aan het ministerie. CE Delft stelt alleen vast of er, volgens de eerder genoemde methode, kosteneffectieve alternatieven zijn gevonden.

Het tweede doel van de studie is om, op basis van de resultaten, **een duiding te geven van de mate waarin kosteneffectieve alternatieve technieken in zicht zijn** voor de verschillende industriële processen waar CCS potentieel aan de orde is. Binnen het industrie- en duurzaamheidsbeleid kan die informatie gebruikt worden om, bijvoorbeeld, gericht te sturen op de verdere ontwikkeling van bepaalde kansrijke alternatieve technieken.

1.3 Methode

De kern van de zeef is het vergelijken van de kosteneffectiviteit van CCS-technieken en alternatieve duurzame technieken. Om de kosteneffectiviteit van potentiële alternatieve technieken te bepalen zal de methode van CE Delft (CE Delft, 2022a) 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 2025 onder embargo van het PBL ontvangen voor het uitvoeren van dit onderzoek.

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: $\text{Subsidie-intensiteit} = (\text{Basisbedrag} - \text{Opbrengsten}) / \text{Netto vermeden emissies in kg CO}_2/\text{eenheid}$. Waarmee met opbrengsten wordt bedoeld: opbrengsten uit GvO's, HBE's, ETS en de langetermijnprijs.

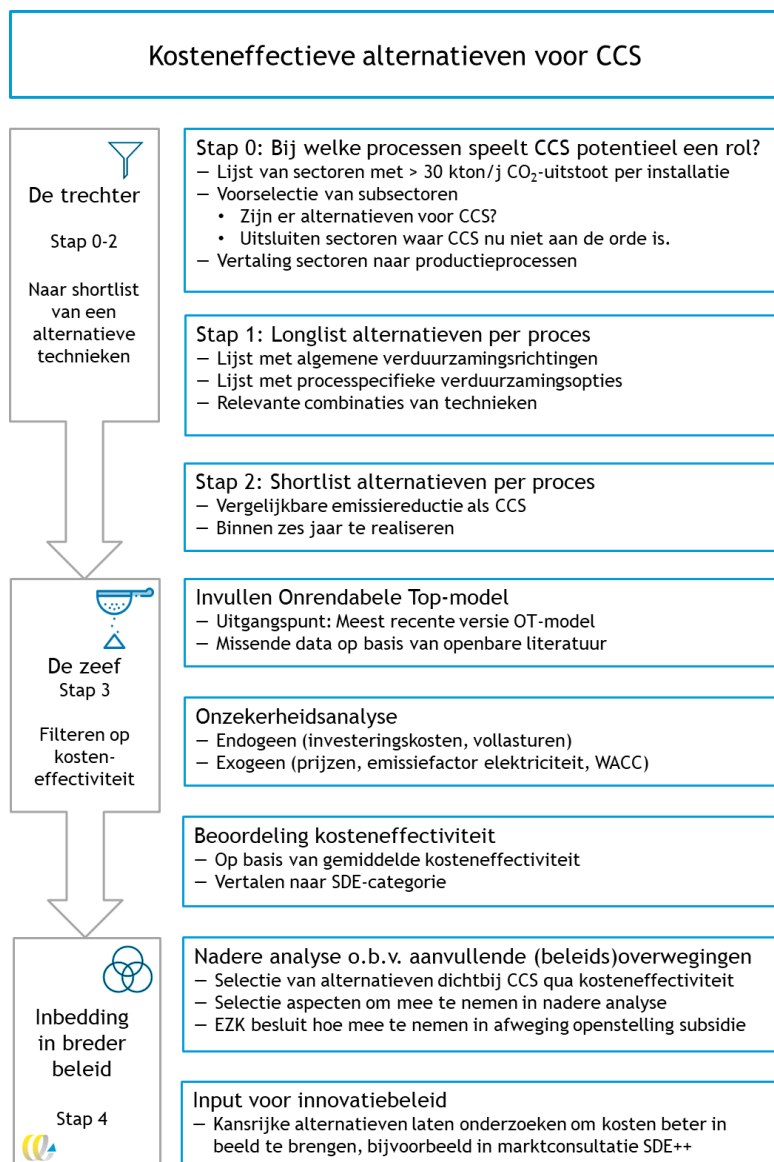
De zeefmethodiek van CE Delft (2022a) bestaat uit drie delen (zie Figuur 1). In het eerste deel (de 'trechter') worden industriële processen waarbij CCS potentieel een rol speelt geïdentificeerd. Voor deze processen worden vervolgens duurzame alternatieve technieken gezocht. Deze lijst van alternatieven 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



1.4 Belangrijke wijzigingen ten opzichte van zeefstudie 2024

We staan hier stil bij twee zaken die belangrijk zijn voor het begrip van dit rapport.

In de eerste plaats hebben we dit jaar, in tegenstelling tot vorig jaar, **de volledige zeefmethodiek opnieuw uitgevoerd**. Voor de subsidieronde van 2024 hebben we in overleg met het ministerie van EZK alleen het tweede deel, de eigenlijke zeef (Stap 3) uitgevoerd, op basis van de lijst alternatieve technieken die het jaar daarvoor was vastgesteld. Ook Stap 4, inbedding in breder beleid, hebben we toen niet uitgevoerd, omdat de alternatieve technieken niet in aanmerking kwamen voor de nadere analyse in deze stap. Dat kwam omdat de gevonden subsidie-intensiteiten voor alternatieve technieken significant hoger lagen dan die voor CCS.

Dit jaar, voor de subsidieronde van 2025, is dus weer de volledige zeefmethodiek uitgevoerd. Hierbij zijn enkele kleine wijzigingen in de relevante processen (Stap 0) en alternatieve technieken (Stap 1 en 2) naar voren gekomen. In Hoofdstuk 2 gaan we hier meer in detail op in.

Ook het laatste onderdeel (Stap 4) is dit jaar weer uitgevoerd, omdat dit jaar de gevonden subsidie-intensiteiten van de alternatieve technieken veel dichterbij die van CCS lagen. Dit heeft te maken met de tweede belangrijke wijziging ten opzichte van vorig jaar.

Deze tweede belangrijke ontwikkeling houdt in dat de berekening van de subsidie-intensiteiten van de technieken in het OT-model ten opzichte van vorig jaar is veranderd.

Vorig jaar hebben wij geconstateerd dat de berekening van de subsidie-intensiteit voor CCS-technieken in het OT-model anders verliep dan voor de alternatieve technieken. Voor CCS-technieken werd in de berekening van de subsidie-intensiteit al rekening gehouden met de ETS-opbrengsten, die bij de toepassing van CCS ontstaan omdat er niet langer ETS-rechten hoeven te worden ingeleverd voor de uitstoot van CO₂. Bij de overige technieken in het OT-model werd dit ETS-voordeel pas in de gecorrigeerde subsidie-intensiteit meegenomen¹. Echter, in de context van de zeef geldt dit ETS-voordeel ook voor de alternatieve technieken, dit zijn immers alternatieven voor CCS: de CO₂-uitstoot van een bepaald proces wordt óf gereduceerd door de CO₂ af te vangen en op te slaan (CCS), óf door over te stappen op een duurzame alternatieve techniek. In beide gevallen dient het ETS-voordeel op dezelfde manier meegerekend te worden.

De berekening van de subsidie-intensiteit is in het OT-model voor 2025 gewijzigd. De gecorrigeerde subsidie-intensiteit is vervallen en het ETS-voordeel wordt nu (samen met andere eventuele voordelen, zoals die gerelateerd aan HBE's) voor alle technieken op dezelfde manier verwerkt in de subsidie-intensiteit. Deze aanpassing was mede op aangeven van het ministerie van KGG naar aanleiding van de staatssteunregeling van de Europese Commissie. Het nieuwe uitgangspunt dat werd meegegeven aan het PBL is dat de waarde van GvO's en HBE wordt meegenomen in de rangschikking. De ETS-correctie wordt enkel in de rangschikking meegenomen als deze voor de meeste projecten in een categorie van toepassing is. Zie verder Tekstkader 1 in Paragraaf 3.2.

Deze wijziging heeft invloed op onze resultaten, maar niet op onze hoofdconclusie.

In feite viel de subsidie-intensiteit voor CCS-technieken in de voorgaande jaren te gunstig uit, omdat hierbij het ETS-voordeel was meegerekend, terwijl dit bij de alternatieve technieken niet was gebeurd. Het gat tussen de subsidie-intensiteiten van CCS-technieken en van duurzame alternatieven was daarom groot. Dit jaar liggen de subsidie-intensiteiten, op basis van de gewijzigde berekening in het OT-model, veel dichterbij elkaar. We identificeren daarom meer technieken die voor een bepaald proces een kosteneffectief alternatief voor CCS vormen. Echter, omdat er ook nog processen zijn waarvoor we geen kosteneffectief alternatief hebben gevonden (met name de productie van waterstof) kan er ook dit jaar geen volledige CCS-categorie van SDE++-subsidie worden uitgesloten.

Onze resultaten van de voorgaande jaren zijn, als de gewijzigde berekening van de subsidie-intensiteit wordt aangehouden, daarmee te pessimistisch geweest wat betreft de kosteneffectiviteit van duurzame alternatieven ten opzichte van die van CCS.

¹ In eerste instantie werd voor CCS-technieken in de gecorrigeerde subsidie-intensiteit nogmaals gecorrigeerd voor het ETS-voordeel. Dit is een evidente dubbeltelling die vorig jaar al door PBL is aangepast. Dit was voor ons de aanleiding om nog eens goed te kijken naar de manier waarop het ETS-voordeel in de berekening van de subsidie-intensiteit is verwerkt, maar staat los van de grotere wijziging in het OT-model van dit jaar.

Deze resultaten zijn daarmee ook niet goed te vergelijken met die van dit jaar. De conclusies ten aanzien van de SDE++-subsidie van de eerdere zeefstudies blijven echter ongewijzigd.

1.5 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden de Stappen 0 tot en met 2 van onze methode (de ‘trechter’) gepresenteerd. Het resultaat van de trechter is een lijst van alternatieve technieken waarvan de kosteneffectiviteit moet worden bepaald. Dit gebeurt in Stap 3 (de ‘zeef’), zoals beschreven in Hoofdstuk 3, per relevant industrieel proces. In Hoofdstuk 4 analyseren we een aantal veelbelovende duurzame alternatieve technieken in een bredere beleidscontext (Stap 4). Tot slot volgt in Hoofdstuk 5 de hoofdconclusie van de studie en een korte beschouwing van de resultaten.

Omdat we in deze studie onze [zeefmethodiek uit 2022](#) (CE Delft, 2022a) opnieuw toepassen, raden we aan dit document bij het lezen bij de hand te houden voor meer details over de verschillende stappen in onze methode.

2 De trechter: identificatie relevante processen en alternatieve technieken

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk voeren we het eerste deel van onze zeefmethodiek uit. Dit deel noemen we de trechter, omdat we toewerken naar een beknopte shortlist van alternatieve technieken die in het volgende deel, de zeef, op kosteneffectiviteit moeten worden geëvalueerd.

In de eerste stap (Stap 0) identificeren we de sectoren waarbij CCS potentieel een rol speelt. In overleg met het ministerie hebben we hierbij de grenswaarde die wij oorspronkelijk hanteerden voor de selectie van potentieel relevante sectoren verlaagd van 100 kton CO₂/jaar naar 30 kton CO₂/jaar. We beschrijven ook de sectoren die we uitsluiten van deze studie, en met welke redenen. Voor deze sectoren kan de zeef per definitie geen beperking vormen voor het aanvragen van een SDE++-subsidie. Vervolgens maken we de vertaalslag van sectoren naar de relevante processen waarvoor CCS potentieel een optie is.

In de tweede stap (Stap 1) stellen we een longlist op van mogelijke duurzame alternatieve technieken. We kijken hierbij expliciet of er nieuwe technieken beschikbaar zijn gekomen, die we in eerdere zeefstudies nog niet hadden meegenomen. In Stap 2 brengen we de longlist terug tot een shortlist op basis van criteria die in de methode zijn vastgelegd.

2.2 Stap 0: Processen waarbij CCS potentieel een rol speelt

2.2.1 Longlist van sectoren met grootschalige CO₂-uitstoot

Bestaande installaties

In onze methode staat beschreven dat voor de selectie van sectoren waarvoor CCS potentieel relevant kan zijn, de stationaire installaties met een CO₂-uitstoot van meer dan 100 kton/jaar moeten worden beschouwd. Deze grenswaarde is vastgesteld op basis van het idee dat dit het kantelpunt is waaronder CCS-installaties niet kosteneffectief kunnen zijn. In overleg met de opdrachtgever is vastgesteld dat er inmiddels (eind 2024) aanvragen voor CCS-installaties zijn rond de 30 kton CO₂/jaar. Voor de huidige trechter nemen wij dit over als grenswaarde. Dit betreft dus een aanscherping van onze methode. Daarom stellen wij voor om dit principe ook op te nemen in de methode: de ondergrens van de trechter zou moeten worden bepaald als de kleinste CCS-installatie waarop SDE++-subsidie is aangevraagd.

Er zijn 147 bestaande installaties in de emissieregistratie (Emissieregistratie, lopend) opgenomen met deze grenswaarde, verdeeld over 42 sectoren. Deze bedrijven stoten gezamenlijk 79,9-86,2 Mtpa uit in 2020-2022.

Er zijn enkele bedrijven die onder de verkeerde sectoren zijn opgenomen. Dit is ook al eerder in het uitvoeren van de trechter opgemerkt. Op het moment betreft dit specifiek Aluchemie die onder de sector ‘Vervaardiging van overige elektronische apparatuur staat’. Deze is verder niet relevant, omdat deze fabriek al een tijd niet meer draait.

Nieuwe installaties

Naast de bestaande installaties nemen we ook een aantal categorieën voor nieuwe installaties mee.² Dit betreft productieprocessen waarvoor een nieuwe installatie subsidiabel is in de SDE+++. Het gaat om de volgende SDE+++ categorieën:

- **Variant 4:** Nieuwe pre-combustion CO₂-afvanginstallaties bij waterstofproductie uit industriële restgassen (ATR).
- **Variant 7:** Nieuwe pre-combustion CO₂-afvanginstallaties bij nieuwe ATR-installaties voor waterstofproductie.
- **Variant 8:** Nieuwe post-combustion CO₂-afvanginstallaties bij nieuwe SMR-installaties voor waterstofproductie.

Voor de overige technieken gaan we uit van bestaande industriële installaties, waar alleen de CO₂-afvanginstallatie nieuw is. Voor de meeste duurzame alternatieven geldt echter wel dat de gehele installatie nieuw is. Als voorbeeld: voor de productie van stoom gebruikt het CCS-alternatief de bestaande aardgasboiler, terwijl de duurzame alternatieven de installatie van een nieuwe boiler met zich meebrengen. Dit zorgt ervoor dat de meerkosten (excl. CO₂-transport- en opslagtarieven) voor CCS beperkt zijn, omdat een groot deel van de huidige installaties behouden kan blijven. Bij geheel nieuwe industriële installaties zal het kostenverschil tussen een fossiele installatie in combinatie met CCS en de duurzame alternatieven veel kleiner zijn. Dit komt doordat voor het CCS-alternatief dan niet alleen een nieuwe CO₂-afvanginstallatie nodig is, maar ook een nieuwe fossiele productie-installatie.

In de huidige SDE- en zeefmethodiek worden de kosten voor een nieuwe fossiele productie-installatie niet meegenomen, terwijl dat voor de nieuwe installatie bij duurzame alternatieven wel gebeurt. Dit is een aandachtspunt waar eventueel in een volgende herziening van de zeefmethodiek bij stilgestaan kan worden.

2.2.2 Voorselectie van sectoren

Conform de methode sluiten we een aantal sectoren uit van evaluatie door de zeef op grond van een aantal criteria. Dit doen we omdat het evalueren van deze sectoren niet bijdraagt aan het doel van de zeef, namelijk bepalen of er duurzame alternatieven zijn voor CCS.

NB: Het uitsluiten van een sector van de zeefstudie betekent dat voor de fossiele referentieprocessen in deze sector dus niet wordt gekeken of er een mogelijk kosteneffectief duurzaam alternatief is. Hierdoor kunnen deze sectoren niet door de zeef worden uitgesloten van SDE+++subsidie voor CCS.

In totaal sluiten we zeventien sectoren uit. In Tabel 1 is een overzicht weergegeven van de criteria en welke sectoren er afvallen per criterium. In Bijlage A is een uitgebreidere toelichting gegeven.

² Voor de overige SDE-categorieën zijn nieuwe installaties niet aan de orde en nemen we ze daarom niet mee in de zeef, zie ook de zeefmethode van 2022 (CE Delft, 2022a).

Tabel 2 - Uitgesloten sectoren van de zeef

Categorie van uitsluiting	Standaard Bedrijfsindeling (SBI)
Afvalverbranding en overige verwerking afval ³	– Behandeling van onschadelijk afval; – Behandeling van schadelijk afval; – Inzameling van onschadelijk afval; – Gesorteerd materiaal voorbereiden tot recycling.
Biogene uitstoot	– Productie van elektriciteit door zonnecellen, warmtepompen en waterkracht⁴.
Elektriciteitsopwekking	– Beheer en exploitatie van transportnetten voor elektriciteit, aardgas en warm water; – Handel in elektriciteit en in gas via leidingen; – Productie en distributie van stoom en gekoelde lucht; – Productie van elektriciteit door thermische, kern- en warmtekrachtcentrales.
Glastuinbouw	– Teelt van aardappels en overige wortel- en knolgewassen; – Teelt van groenten onder glas.
Onvermijdbare procesemissies	– Groothandel in vloeibare en gasvormige brandstoffen; – Productie van waterstof uit restgas; – Opslag in tanks.
Overige uitsluitingen: er is slechts een bedrijf actief en er wordt ingezet op een andere verduurzamingsmethode dan CCS	– Mouderijen; – Vervaardiging van aluminium; – Vervaardiging van overige elektrische apparatuur.
Staalproductie	– Vervaardiging van ijzer en staal en van ferrolegeringen.

2.2.3 Vertaling van sectoren naar processen

Door de longlist te verminderen met de uitgesloten sectoren, komen we op een lijst van sectoren die binnen de scope van de zeef vallen. Per sector zoeken wij de processen die zorgen voor de CO₂-uitstoot. Het zijn deze processen die verduurzaamd moeten worden en waar CCS een van de mogelijkheden voor is.

De geselecteerde sectoren worden vertaald naar processen door te kijken wat de voor- naamste processen zijn die CO₂ uitstoten binnen een sector. Dit doen we op basis van industriekennis binnen CE Delft en literatuuronderzoek. De omschrijving van de processen in een sector kan op verschillende detailniveaus uitgevoerd worden:

- Een zeer fijnmazige manier kan rekening houden met alle processpecifieke factoren en verduurzamingsopties, maar vereist evaluatie van een groot aantal deelprocessen.

³ Het belangrijkste argument om de afvalsector uit te sluiten, is dat bestaande alternatieven die voor minder afval zorgen buiten de scope van de zeef vallen, omdat het een ander beleidsterrein betreft. Gegeven de afvalstroom is CCS geen onwenselijke optie. Tijdens de discussie met de opdrachtgever is naar voren gekomen dat vergassing van afval mogelijk wel als duurzame alternatieve techniek kan worden beschouwd. Een volgende zeefstudie zou de afvalsector mee kunnen nemen en vergassing met CCS kunnen vergelijken.

⁴ Onder deze SBI staat maar één installatie: biomassacentrale Moerdijk. Deze staat dus onder de verkeerde SBI-code geregistreerd. De uitstoot van deze biomassacentrale is biogeen, daarom wordt deze SBI uitgesloten.

De informatie over de alternatieven voor deze deelprocessen is vaak gebrekkig en alleen combinaties van verduurzaming van grote aantallen deelprocessen zullen voldoende emissiereductie behalen om een waardig alternatief voor CCS te kunnen zijn.

- Een zeer grofmazige manier doet echter onvoldoende recht aan de verschillen tussen sectoren en deelprocessen.

Als voorbeeld nemen we de raffinagesector. Een fijnmazige manier zou onderscheid kunnen maken tussen de verschillende processen op een raffinaderij: atmosferische destillatie, hydrotreating, katalytisch kraken, etc. Een nog gedetailleerdere manier zou zelfs de deelprocessen kunnen beschouwen. Bijvoorbeeld voor katalytisch kraken: voorverwarmen van de voeding, het kraakproces zelf, destillatie van de producten, recycling van waterstof. Een meer grofmazige manier zou op het niveau van de hele raffinaderij juist alleen stoomboilers en fornuizen voor hogetemperatuurwarmte onderscheiden.

We hebben ervoor gekozen om een middenweg te kiezen, waarbij we de meest gebruikte deelprocessen apart evalueren. De focus ligt hierbij op de meest energie-intensieve stap in het productieproces, omdat die in het algemeen in ieder geval aangepakt moet worden om voldoende emissiereductie te behalen.

Procesemissies, specifiek binnen de kunststofproductie, hebben we buiten beschouwing gelaten. Dit doen wij door een combinatie van argumenten. Ten eerste zijn dit vaak onvermijdbare emissies, ten tweede is het aantal producenten gelimiteerd en als laatste zijn het zeer specifieke processen die in groot detail gemodelleerd zouden moeten worden. In Tabel 3 staan de resulterende processen per sector weergegeven.

Hiermee komen we uit op een lijst van zeven processen:

1. Productie van lagetemperatuurstoom.
2. Productie van lagetemperatuurswarmte.
3. Productie van midden- en hogetemperatuurstoom.
4. Productie van midden- en hogetemperatuurswarmte.
5. Productie van waterstof uit aardgas.
6. Compressie van gassen.
7. Indampen van waterige oplossingen.

Tabel 3 - Belangrijkste CO₂-uitstotende processen per SBI die volgens de Trechter relevant zijn⁵

Standaard Bedrijfsindeling	Proces
Aardolieraffinage	MT/HT-stoom MT/HT-warmte
Elektrotechnische bouwinstallatie	LT-stoom
Universitair medische centra	LT-warmte LT-stoom
Vervaardiging van aardappelproducten	LT-stoom MT/HT-stoom
Vervaardiging van bier	LT-stoom MT/HT-stoom
Vervaardiging van glasvezels	MT/HT-stoom
Vervaardiging van holglas	MT/HT-warmte
Vervaardiging van grafisch papier en karton	LT-stoom
Vervaardiging van papier en karton voor verpakking	Indampen van waterige oplossingen

⁵ LT = Lage temperatuur (<200 °C); MT = Midden temperatuur (200-500 °C); HT = Hoge temperatuur (500> °C).

Standaard Bedrijfsindeling	Proces
Vervaardiging van industriële gassen	Productie van waterstof uit aardgas
Vervaardiging van kunstmeststoffen en stikstofverbindingen	MT/HT-stoom
Vervaardiging van kleurstoffen en pigmenten	Indampen van waterige oplossingen MT/HT-warmte
Vervaardiging van kunststof in primaire vorm	MT/HT-stoom
Vervaardiging van petrochemische producten	MT/HT-warmte Compressie van gassen
Vervaardiging van niet-metaalhoudende minerale producten (geen schuur-, slijp- en polijstmiddelen)	MT/HT-warmte
Vervaardiging van organische basischemicaliën (geen petrochemische producten)	MT/HT-warmte LT-stoom
Vervaardiging van overige anorganische basischemicaliën	Indampen van waterige oplossingen
Winning van overige delfstoffen n.e.g.	MT/HT-warmte
Vervaardiging van overige chemische producten n.e.g.	MT/HT-warmte Indampen van waterige oplossingen
Vervaardiging van overige voedingsmiddelen n.e.g.	LT-warmte LT-stoom
Vervaardiging van plantaardige en dierlijke oliën en vetten (geen margarine en andere spijsvetten)	LT-stoom MT/HT-stoom
Vervaardiging van veevoeders	LT-stoom
Vervaardiging van zetmeel en zetmeelproducten	Indampen van waterige oplossingen
Vervaardiging van suiker	
Vervaardiging van zuivelproducten (geen consumptie-ijs)	

Hierna bespreken wij enkele overwegingen die anders zijn dan in eerdere varianten van de zeefstudie. Verdere uitleg per sector is te vinden in Bijlage A.

Onvermijdbare procesemissies

Binnen verschillende sectoren zijn er onvermijdbare procesemissies. Bijvoorbeeld bij de verwerking van nafta tot chemische producten, zijn er processen waar CO₂ vrijkomt als bijproduct.

In het geval van naftakraken (SBI: 'Vervaardiging van petrochemische producten'), worden deze emissies dan niet meegenomen als proces waarvoor alternatieve technieken in de zeef moeten worden onderzocht. Deze emissies kunnen alleen voorkomen worden door het gebruik van biograndstoffen (bionafta), of door een totaal ander proces. Beide varianten zijn niet beschikbaar in het OT-model, en zijn te specifiek om te beschouwen binnen dit project.

De sectoren die volledig worden uitgesloten door deze uitsluitingsgrond, worden uitgesloten omdat zij handelen in fossiele brandstoffen. Hierbij komen onvermijdelijk fossiele emissies vrij. Deze emissies kunnen voorkomen worden, als deze bedrijven gaan handelen in brandstoffen met niet-fossiele oorsprong. De transitie van fossiele brandstoffen naar biobrandstoffen is een belangrijke stap richting een duurzame economie. Dit zou in onze ogen gestuurd moeten worden via grond-, afval- en brandstoffenbeleid. In de zeefstudie kijken we naar alternatieven voor CCS binnen de huidige industrie en de bijbehorende processen. Het hervormen van de industrie door biobrandstoffen (voor mobiliteit) te produceren en gebruiken in plaats van fossiele brandstoffen is buiten de scope van de zeefstudie.

Dit is dezelfde argumentatie om 'Afvalverbranding en overige verwerking afval' uit te sluiten van de zeef.

Glastuinbouw

De uitstoot van CO₂ door de glastuinbouw komt door de inzet van wkks, die warmte, stroom en CO₂ produceren door aardgas te verbranden. Het produceren van CO₂ is hierbij specifiek het doel, omdat dit de planten sneller laat groeien. De glastuinbouw zal dan ook niet gaan inzetten op CCS en wij sluiten hierom deze sector uit van onze verdere analyse.

CCU als alternatief

Carbon capture and utilization (CCU) is een alternatief voor CO₂-afvang en opslag (CCS). Bij CCU wordt CO₂ gebruikt als grondstof voor producten zoals ethanol ((North Sea Port, 2022)). Een ander voorbeeld is het gebruik van CO₂ in de glastuinbouw, waarbij het wordt gebruikt voor de groei van planten. CCU is een belangrijk onderdeel van de circulaire economie, waar olie en gas niet langer de koolstofbron van de economie zijn.

Wij zullen CCU echter niet als alternatief voor CCS evalueren. Dit betekent CCU niet als mogelijk kosteneffectief alternatief een CCS categorie kan uitsluiten van SDE++ subsidie, op basis van de zeefstudie.

De zeef is gericht op kostenefficiënte duurzame technologieën die een alternatief vormen voor CCS. In onze visie kan CCU niet gezien worden als duurzaam alternatief voor groot-schalige CCS om de volgende redenen:

1. Bij CCU met fossiele CO₂ is er nog steeds gebruik van fossiele brandstoffen en CO₂-afvang nodig om de CO₂ beschikbaar te kunnen maken voor hergebruik. CCU met CO₂ afgevangen uit de atmosfeer (Direct Air Capture) of biogene CO₂ heeft dit nadeel niet. Deze technieken zijn beide echter al uitgesloten van de zeef.
2. De netto emissiereductie van CCU is sterk afhankelijk van de toepassing. Het is geen gegeven dat CCU netto emissies reduceert:
 1. Voor de meeste CCU-processen is veel hulpenergie nodig, die ook weer CO₂-uitstoot tot gevolg heeft als dit fossiel is. Hernieuwbare elektriciteit kan beter gebruikt worden om direct fossiele elektriciteit te vervangen dan voor CCU.
 2. De periode dat CO₂ wordt vastgelegd verschilt sterk per toepassing. De uitstoot van CO₂ wordt over het algemeen niet voorkomen, maar er wordt wel vermeden dat er fossiele brandstoffen/producten worden geproduceerd. De vastleggingsduur verschilt van dagen tot weken voor directe toepassing, weken tot maanden voor brandstoffen, maanden tot jaren voor chemicaliën, jaren tot decennia voor producten en decennia tot eeuwen voor mineralisatie (CE Delft et al., 2018).
3. CCU-ketens zijn kleinschaliger dan CCS-ketens. CO₂-opslagprojecten hebben een schaal van enkele tot tientallen Megatonnen per jaar, terwijl CCU-projecten een schaal hebben van enkele tientallen tot honderden kilotonnen per jaar (CO₂ Value Europe, lopend): een factor 10-100 kleiner dus. Zelfs als CCU grootschalig wordt toegepast, dan zal alsnog de meeste CO₂ moeten worden opgeslagen omdat de CCU-ketens de toestroom niet kunnen verwerken.

2.3 Stap 1: Longlist van alternatieve technieken per proces

Het doel van Stap 1 uit de zeefmethodiek is het bepalen van een longlist van CCS- en duurzame alternatieve technieken. We bepalen alleen voor de relevante productieprocessen uit Stap 0 een longlist van mogelijke technieken. Daarbij worden nog geen opties geselecteerd of afgekeurd.

We stellen eerst een lijst op met algemene verduurzamingsrichtingen, zoals 'biomassa', 'elektrificatie' of 'recycling'. Vervolgens maken we die algemene richtingen specifiek voor de processen uit Stap 0. Dat geldt ook voor de toe te passen variant van CCS. De methodiek houdt de MIDDEN-database en MIDDEN-rapporten als uitgangspunt. Echter zijn de inzichten uit de MIDDEN-database niet bijgewerkt sinds de eerste zeefstudie. Daarmee blijven de redeneringen zoals uitgezet in Bijlage C van ons 2023-rapport het meest actueel (CE Delft, 2023b).

Wel zijn er twee toevoegingen aan de lijst. In de eerste plaats breiden we de CCS-scope uit. Daarin nemen we naast gasvormig transport van CO₂ ook vloeibaar transport mee. Dit is op verzoek van het ministerie naar aanleiding van de vorige zeefstudie. Bovendien identificeren we twee additionele alternatieve technieken in deze studie: de RotoDynamic Heater en de (Reduced) Iron Fuel Technology. Die worden hieronder nader toegelicht. We hebben deze technieken geïdentificeerd op basis van literatuuronderzoek en een tweetal interviews met experts. Daarmee is de longlist als volgt, zie Tabel 4.

Tabel 4 - Longlist van alternatieve technieken per proces

Proces	Technieken (zowel CCS als duurzame alternatieven)
Productie van lagetemperatuurstoom	HT-warmtepomp Waterstofboiler Vaste biomassa boiler Groengas boiler Restwarmtestoom Aardgasgestookte boiler met post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport Aardgasgestookte boiler met post-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport
Productie van midden- en hogetemperatuurstoom	Waterstofboiler Vaste biomassa boiler Groengas boiler Aardgasgestookte boiler met post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport Aardgasgestookte boiler met post-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport RIFT Boiler
Productie van midden- en hogetemperatuurswarmte	Waterstoffornuis Fornuis vaste biomassa Groengasfornuis RIFT Boiler Aardgasgestookt procesfornuis met post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport Aardgasgestookt procesfornuis met post-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport RotoDynamic Heater

Proces	Technieken (zowel CCS als duurzame alternatieven)
Productie van waterstof	Groene waterstof (elektrolyse) Reforming met groengas Bestaande SMR op aardgas, pre-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport. Bestaande SMR op aardgas, pre-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport. Bestaande SMR op aardgas, post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport. Bestaande SMR op aardgas, post-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport. Nieuwe SMR op aardgas, post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport. Nieuwe SMR op aardgas, post-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport. Nieuwe ATR op aardgas, pre-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport. Nieuwe ATR op aardgas, pre-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport. Bestaande ATR op aardgas, pre-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport. Bestaande ATR op aardgas, pre-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport.
Compressie van gassen	Geen alternatieven geïdentificeerd.
Indampen van waterige oplossingen	Waterstofboiler Vaste biomassa boiler Groengas boiler MVR Aardgasgestookte boiler met post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport Aardgasgestookte boiler met post-combustion CO ₂ -afvang, vloeibaar transport

RotoDynamic Heater

Naast de installaties uit de vorige zeefstudie nemen we ook een aantal nieuwe technieken mee. Eén van die duurzame alternatieven is de RotoDynamic Heater (RDH) waarbij hernieuwbare elektriciteit wordt benut om extreem hogetemperatuurswarmte te bereiken. De extreem hogetemperatuurswarmte kan daarmee voorzien in de thermische energie-behoefte van de meeste industriële processen in de ijzer- en staalindustrie, cement-industrie en de chemische basisindustrie.

De RDH streeft ernaar conventionele verbranding van fossiele brandstoffen ten behoeve van industriële procesverwarming te vervangen door de warmtevoorziening te elektrificeren. Daarbij worden industriële gassen samen met lucht en stikstof verwarmd tot extreem hoge temperaturen tot circa 1.700 °C met een catalogusrendement van minimaal 90%. Doordat tijdens het proces geen fysieke verbranding plaatsvindt, is er ook geen additionele CO₂-uitstoot en is de uitstoot van stikstof- en fijnstof nihil (Coolbrook, 2024).

Coolbrook, het bedrijf achter de RDH-technologie, heeft momenteel al commerciële demonstratieprojecten operationeel bij klanten in de staal- en cementindustrie. Per 2025 is het streven volledig over te gaan op commercialisatie (Coolbrook, 2024).

Iron Fuel Technology

Naast de RotoDynamic Heater hebben we ook de ijzerbrandstofboiler kunnen identificeren als duurzaam alternatief. De ijzerbrandstofboiler behelst de zogenaamde Reduced Iron Fuel Technology (of RIFT) waarmee industriële warmte kan worden geproduceerd via een duurzame weg dan het traditioneel verbranden van aardgas in een aardgasketel.

Door een gecontroleerde verbranding van ijzerpoeder wordt thermische energie geproduceerd waarmee in de warmtevraag vanuit de industrie kan worden voorzien. Na verbranding wordt de resterende ijzeroxide weer omgezet naar ijzerpoeder met behulp van waterstof. Gedurende dit proces zijn de CO₂-emissies nihil (ervan uitgaande dat groene waterstof de norm is) en zijn de stikstofemissies bij verbranding circa 66% lager ten opzichte van een traditionele gasboiler of het verbranden van kolen (Verhagen, 2024).

Het ijzerpoeder is gemaakt van schrootijzer, waarvoor een mondiale markt aanwezig is. De ijzerbrandstofboiler kan met een batch functioneren, soortgelijk aan het principe van koudemiddelencirculatie in warmtepompen. Op termijn dient een dergelijke boiler aangevuld te worden met ijzerpoederbrandstof. Additioneel kunnen eventuele ijzeroxide-residuen worden verhandeld op de ijzeroxidemarkt.

RIFT beheert momenteel twee pilot plants met een gecombineerde ijzerbrandstofboilersysteem en ijzerbrandstofproductiefaciliteit. Met de twee demonstratieprojecten zit RIFT momenteel op een (extern gevalideerde) TRL 7. Het ijzerbrandstofboilersysteem heeft een energetisch rendement van 96%, uitgaande van zowel LHV als HHV. Momenteel zit de businesscase van een megawatt geproduceerde thermische energie op € 75-140 (Verhagen, 2024).

2.4 Stap 2: Shortlist van alternatieve technieken

In deze stap korten we de longlist van alternatieve technieken in tot een shortlist op basis van twee, van tevoren in de methodiek vastgelegde criteria. Dit zijn:

1. Het behalen van een CO₂-reductie van ten minste 80% en;
2. Het realiseerbaar zijn van de techniek binnen een periode van zes jaar (om te garanderen dat de leadtime van de duurzame alternatieven vergelijkbaar is met die van CCS).

Voor de alternatieven die in vorige zeefstudies ook al op de longlist stonden zijn er geen wijzigingen en verwijzen we voor de details naar Bijlage C in de zeefstudie voor 2023 (CE Delft, 2023b).

Voor de twee duurzame alternatieven die nieuw op de longlist zijn geplaatst, geldt dat de RotoDynamic Heater aan criteria 1 voldoet. Echter hebben we criteria 2 niet (extern) kunnen valideren en hebben daardoor momenteel onvoldoende kennis om de techniek accuraat te toetsen. Deze techniek valt dus dit jaar af voor de shortlist, maar kan bij in een eventuele vervolgstudie verder worden onderzocht. Voor RIFT is daarentegen wel helder dat deze dusdanig voldoende is ontwikkeld om binnen de realisatietermijn in criteria 2 toegepast te worden. Bovendien is deze techniek per 2025 opgenomen in het OT-model. We nemen daarom RIFT wel mee in de shortlist, die er daarmee als volgt uit ziet:

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.
12. IJzerpoederbrandstofboiler (RIFT)

Fossiele referentietechnieken

1. Aardgasgestookte boiler met post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
2. Aardgasgestookte boiler met post-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.
3. Aardgasgestookt procesfornuis met post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
4. Aardgasgestookt procesfornuis met post-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.
5. Bestaande SMR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
6. Bestaande SMR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.
7. Bestaande SMR op aardgas, post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
8. Bestaande SMR op aardgas, post-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.
9. Nieuwe SMR op aardgas, post-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
10. Nieuwe SMR op aardgas, post-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.
11. Nieuwe ATR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
12. Nieuwe ATR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.
13. Bestaande ATR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, gasvormig transport.
14. Bestaande ATR op aardgas, pre-combustion-CO₂-afvang, vloeibaar transport.

Deze shortlist van CCS-technieken en duurzame alternatieven vormt de basis voor de volgende stap, de ‘zeef’ zelf, die in het volgende hoofdstuk behandeld wordt.

3 De zeef: evaluatie kosten-effectiviteit

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk werken we de zeef uit, waarbij we de technieken op de shortlist evalueren op kosteneffectiviteit (c.q. subsidie-intensiteit). Dit hoofdstuk vormt daarmee Stap 3 uit de herziene zeefmethodiek uit (CE Delft, 2022a). Per proces bepalen we voor elk van de alternatieven, waaronder CCS, wat de resulterende subsidie-intensiteiten zijn. De kosteneffectiviteit 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-2025-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 zoveel mogelijk mee overeenkomen, maar er is niet altijd een één-op-één-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.

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 3.2.

3.2 Bepaling subsidie-intensiteit en gevoeligheidsanalyse

De kern van onze analyse bestaat uit het vergelijken van de subsidie-intensiteiten van CCS-technieken en duurzame alternatieve technieken per relevant proces. Zoals in de Inleiding genoemd, is de berekening van de subsidie-intensiteit in het OT-model dit jaar veranderd. Dit heeft te maken met de manier waarop het ETS-voordeel in de subsidie-intensiteit wordt verwerkt. In Tekstkader 1 gaan we hier in detail op in.

Tekstkader 1 - Het ETS-voordeel en de rol hiervan in de berekening van de subsidie-intensiteit in het OT-model

ETS-voordeel in de berekening van de subsidie-intensiteit

Ten tijde van de zeefstudie van vorig jaar constateerde CE Delft dat het OT-model destijds relatief gunstigere subsidie-intensiteiten berekende voor CCS-categorieën dan voor duurzame alternatieve technieken. In de berekening van de subsidie-intensiteit voor CCS was het correctiebedrag gelijk aan de lange termijn ETS-prijs van CO₂. Immers, bij het toepassen van CCS hoeven minder emissierechten te worden afgedragen en worden deze om die reden als opbrengsten beschouwd. Hierin zit het ETS-voordeel dus al verwerkt. Bij de alternatieve duurzame technieken was er geen ETS-voordeel verwerkt in de subsidie-intensiteit.

Het OT-model rekende ook een *gecorrigeerde* subsidie-intensiteit uit. Daarin werd in een aparte stap gecorrigeerd voor opbrengsten uit GvO's, HBE's en *nogmaals* ETS. De langetermijn ETS-prijs van CO₂ werd bij CCS-categorieën dus tweemaal afgetrokken van het basisbedrag om tot de gecorrigeerde subsidie-intensiteit te komen. Daardoor vielen de gecorrigeerde subsidie-intensiteiten voor CCS-categorieën veel gunstiger uit dan ze in werkelijkheid waren. De gunstigere gecorrigeerde subsidie-intensiteit had invloed op de rangschikking die projecten evalueert op basis van de gevraagde subsidie en bijbehorende CO₂-reductie. PBL heeft naar aan-
geven van CE Delft deze dubbeltelling in het OT model aangepast.

Ook voor de nominale subsidie-intensiteit was de vergelijking tussen CCS- en duurzame alternatieve technieken voor gebruik in de zeefstudie op deze manier echter niet eerlijk. Binnen de zeefstudie zijn de duurzame technieken immers alternatieven voor CCS, dus in beide gevallen is er sprake van een ETS-voordeel omdat er geen CO₂-emissies meer plaatsvinden.

In het OT model voor 2025 is de subsidie-intensiteit (zonder GvO-, HBE- of ETS-voordelen) vervangen door de voorheen genoemde gecorrigeerde subsidie-intensiteit (met GvO-, HBE- of ETS-voordelen). De GvO-, HBE- en ETS-voordelen worden nu meegenomen in de berekening van de 'reguliere' subsidie-intensiteit. Deze aanpassing was mede op aangeven van het ministerie van KGG naar aanleiding van de staatssteunregeling van de Europese Commissie. Het nieuwe uitgangspunt dat werd meegegeven aan het PBL is dat de waarde van GvO's en HBE wordt meegenomen in de rangschikking. De ETS-correctie wordt enkel in de rangschikking meegenomen als deze voor de meeste projecten in een categorie van toepassing is.

Deze berekening geeft in onze ogen beter de situatie weer die in de zeefstudie aan de orde is, namelijk dat in een industrieel proces met significante CO₂-emissies, deze emissies worden gemitigeerd door ofwel CCS toe te passen ofwel een alternatieve duurzame techniek.

Het gevolg van het meenemen van de GvO-, HBE- en ETS-voordelen in de berekening van de subsidie-intensiteit voor alle technieken, is dat de duurzame alternatieven kosteneffectiever worden ten opzichte van CCS, in vergelijking met de berekening voor subsidie-intensiteit in voorgaande jaren. Kosteneffectiever betekent hier een lagere subsidie-intensiteit. Met andere woorden, het gat tussen de subsidie-intensiteit van CCS en van de duurzame alternatieven is in eerdere zeefstudies te hoog ingeschat, omdat het hier in feite deels ging om een ETS-voordeel dat alleen voor de CCS-technieken was toegepast. De hoofdconclusies van de eerdere zeefstudies blijven echter ongewijzigd.

Binnen de SDE wordt voor de subsidie-intensiteit één waarde gehanteerd, zonder onzekerheidsmarge. Tijdens de ontwikkeling van de herziene zeefmethodiek is er echter voor gekozen 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 5 is weer-gegeven 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, 2022a).

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 zeef-methodiek: 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 5 - 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}	€ 0,032	€ 0,053	€ 0,101
	Elektriciteitsprijs	€/kWh	€ 0,047	€ 0,070	€ 0,107
	Waterstofprijs	€/kWh _{LHV}	€ 0,051	€ 0,078	€ 0,142
	CO ₂ -prijs	€/ton CO ₂	€ 106	€ 157	€ 194
	Emissiefactor elektriciteit	kg CO ₂ /kWh	0,099	0,130	0,197
	WACC		-25%	Nominale waarde	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 40% daalt door de veel lagere gasprijs, terwijl de kosten van biomassa-reststromen als vast worden verondersteld.

3.3 Resultaten per proces

Hierna worden de resultaten van de berekening van de kosteneffectiviteit per proces weer-gegeven. Volgens de zeefmethodiek (CE Delft, 2022a) kijken we voor de beoordeling van kosteneffectiviteit alleen naar de middenwaarde, aangegeven door de zwarte streep in de grafieken. De bandbreedte die tot stand komt door het Laag/Midden/Hoog scenario, is relevant als er overlap is tussen een fossiele referentietechniek en een duurzaam alternatief. Dit is beschreven in Paragraaf 4.2. Ook zullen we reflecteren op de bandbreedten van de scenario's, voor de duiding van kansrijke alternatieven in Paragraaf 3.3. De bandbreedte ontstaat namelijk door verschil in aannames van energieprijzen, aantal vollasturen, investerings- en operationele kosten (zie Tabel 5).

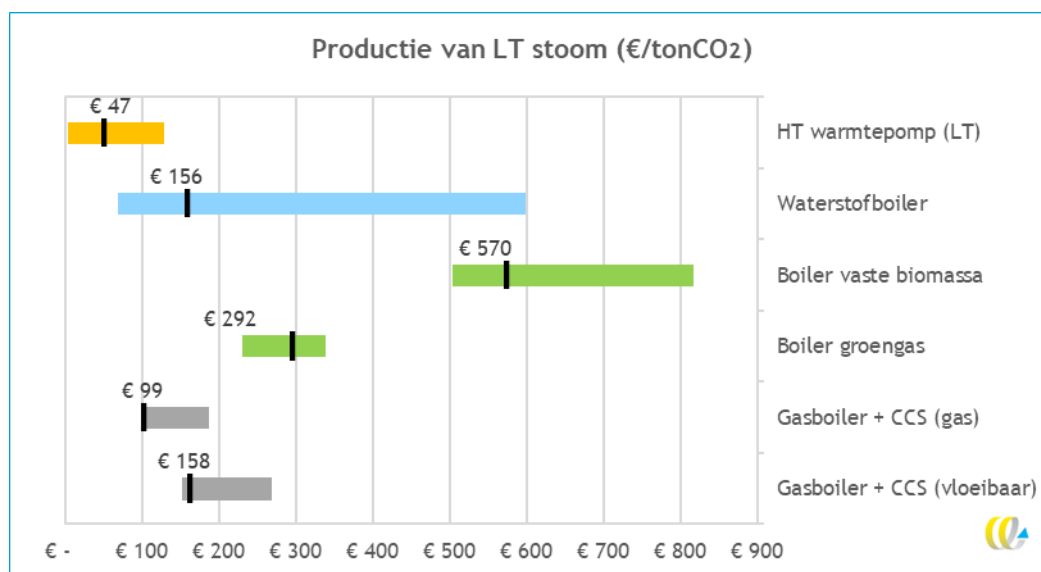
3.3.1 Productie van LT-stoom

De subsidie-intensiteit voor de productie van lage temperatuur (LT-)stoom is weergegeven in Figuur 2. De twee fossiele referentieprocessen, met gasvormig of vloeibaar CO₂-transport, hebben overlap met drie duurzame alternatieven. Dit zijn de HT-warmtepomp, waterstofboiler en de groengasboiler. De boiler op vaste biomassa heeft een fors hogere subsidie-intensiteit dan de fossiele referentietechnieken en valt daarmee af als kosteneffectief alternatief. Volgens de zeefmethodiek (CE Delft, 2022a) kijken we voor de beoordeling van kosteneffectiviteit alleen naar de middenwaarde, aangegeven door de zwarte streep.

Als we kijken naar de middenwaarde heeft de **HT-warmtepomp (€ 47/ton CO₂)** de laagste subsidie-intensiteit van alle technieken voor de productie van LT-stoom. Hiermee kan dus volgens onze methodiek worden gesteld dat de HT-warmtepomp kosteneffectiever is dan CCS met vloeibaar of gasvormig transport van CO₂.

De **waterstofboiler (€ 157/ton CO₂)** en de **boiler op groengas (€ 292/ton CO₂)** hebben beiden middenwaarden die in de buurt zitten van CCS met vloeibaar transport (€ 158/ton CO₂). Strikt genomen is de waterstofboiler kosteneffectiever dan de CCS-techniek met vloeibaar transport, maar het verschil is klein en de onzekerheidsmarge in de subsidie-intensiteit van de waterstofboiler is relatief groot.

Figuur 2 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van Lage Temperatuur (LT) stoom.



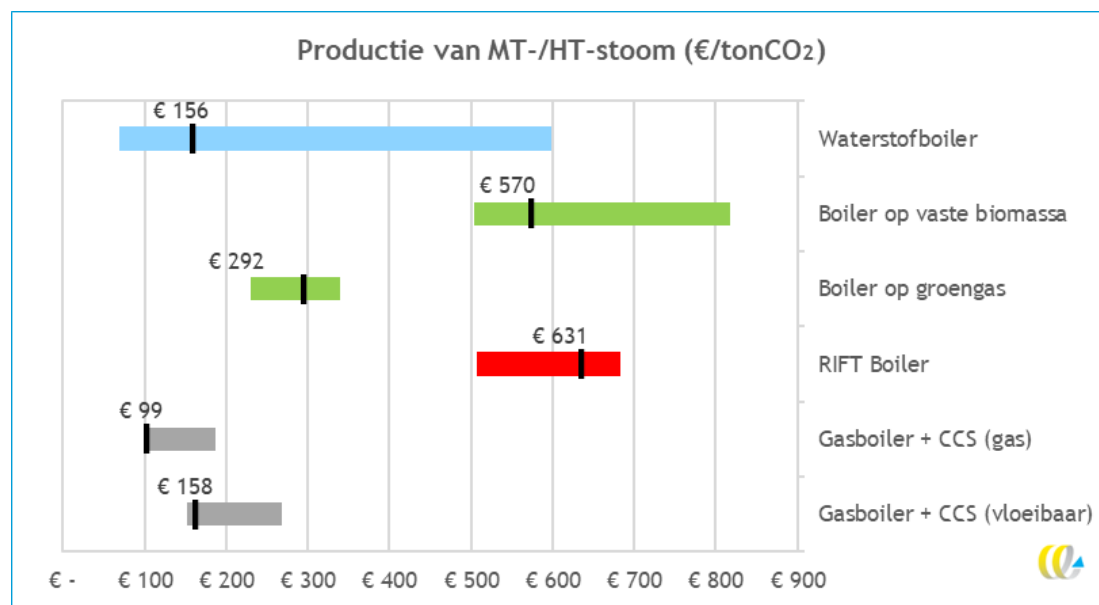
Noot: Voor de waterstofboiler is de aanname dat deze groene waterstof als input neemt die geproduceerd is met een SDE++ gesubsidieerde elektrolyser. Het correctiebedrag is hier de lange-termijn waterstofprijs, welke de marktprijs van (grijze) waterstof representeert. Aangezien de elektrolyser dus al SDE++ subsidie heeft ontvangen, vindt er geen dubbeltelling plaats. Een categorie zoals de waterstofboiler, die nu niet in de SDE++ regeling bestaat, zou iets soortgelijks wel als strikte voorwaarde moeten hebben om dubbele subsidie te voorkomen.

Als we het effect van de ETS-correctie buiten beschouwing laten dan zien we dat de subsidie-intensiteit van de hogetemperatuurwarmtepomp ten opzichte van vorig jaar met circa 45 €/ton CO₂ (middenwaarde) is afgenomen, en daarmee dichterbij de CCS-technieken komt, door relatief lagere kosten. Voor de waterstof- en groengas boiler zijn die kosten juist toegenomen.

3.3.2 Productie van MT/HT-stoom

De subsidie-intensiteit voor de productie van midden/hoog temperatuur (MT-/HT-)stoom is weergegeven in Figuur 3. De twee fossiele referentieprocessen, Gasboiler + CCS varianten met gasvormig en vloeibaar CO₂-transport, hebben overlap met twee duurzame alternatieven: de waterstofboiler en de boiler op groengas. De overige duurzame alternatieven hebben een subsidiebehoefte die niet kosteneffectiever is dan de fossiele referentietechnieken. Met name de boiler op ijzerpoeder (c.q. Reduced Iron Fuel Technology, of RIFT) en de boiler op groengas zijn relatief duur.

Figuur 3 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van Middel/Hoge temperatuur (MT-/HT-)stoom.



Noot: Voor de RIFT boiler is dit een voorlopig resultaat.

Noot 2: Voor de waterstofboiler is de aanname dat deze groene waterstof als input neemt die geproduceerd is met een SDE++ gesubsidieerde elektrolyser. Het correctiebedrag is hier de lange-termijn waterstofprijs, welke de marktprijs van (grijze) waterstof representeert. Aangezien de elektrolyser dus al SDE++ subsidie heeft ontvangen, vindt er geen dubbeltelling plaats. Een categorie zoals de waterstofboiler, die nu niet in de SDE++ regeling bestaat, zou iets soortgelijks wel als strikte voorwaarde moeten hebben om dubbele subsidie te voorkomen.

Voor de alternatieven met overlap geldt dat de middenwaarde binnen de bandbreedte valt van de fossiele referentietechnieken. De **waterstofboiler** is met een subsidie-intensiteit van 69/156/598 €/ton CO₂ in het Laag-/Midden-/Hoog-scenario een relatief aantrekkelijk alternatief voor de gasboilers in combinatie met CCS. Voor CCS met vloeibaar transport is dit alternatief nominaal zelfs kosteneffectiever, al is het verschil klein en is de onzekerheidsmarge van de subsidie-intensiteit van de waterstofboiler groot. Daarnaast is ook de **boiler op groengas** met een subsidie-intensiteit van 339/292/230 €/ton CO₂ in het Laag-/Midden-/Hoog-scenario een alternatief dat qua kosteneffectiviteit in de buurt komt van CCS, maar nominaal niet kosteneffectiever is.

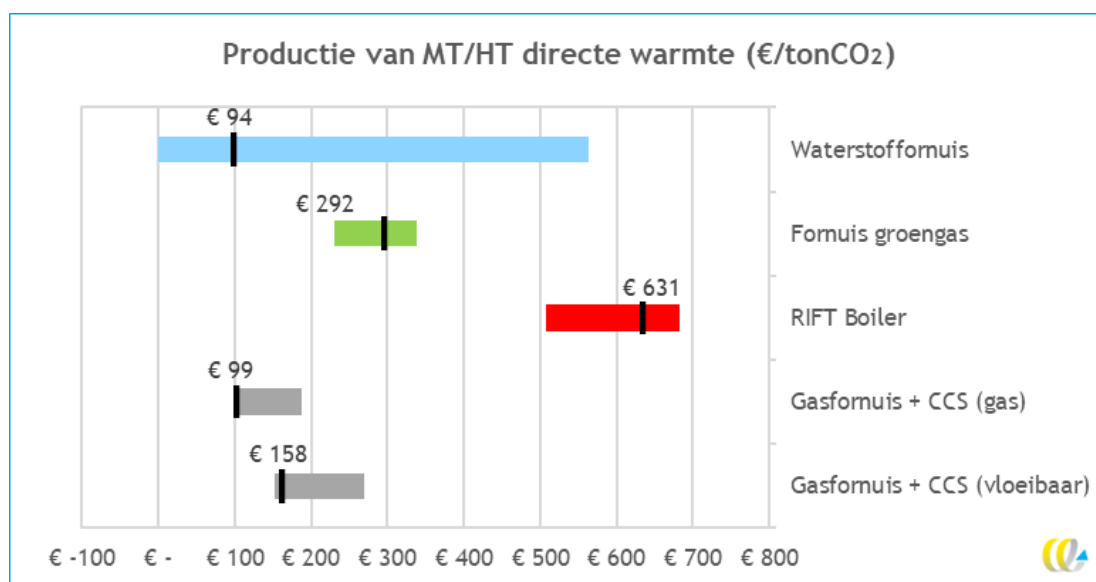
3.3.3 Productie van MT/HT directe warmte

De subsidie-intensiteit voor de productie van midden-/hoogtemperatuur-(MT-/HT-)stoom is weergegeven in Figuur 4. De twee fossiele referentieprocessen betreffen aardgasgestookte procesfornuizen in combinatie met CO₂-afvang, of kort: de Gasfornuis en CCS-varianten 5A (gasvormig CO₂-transport) en 5B (vloeibaar CO₂-transport). Beiden hebben overlap met twee duurzame alternatieven: het waterstoffornuis en het groengasfornuis. Het overige alternatief (RIFT) heeft een subsidiebehoefte die veel hoger is dan de CCS-referentietechnieken.

Het **waterstoffornuis** blijkt met een subsidie-intensiteit van -4/94/559 €/ton CO₂ in het Laag-/Midden-/Hoog-scenario een kosteneffectief alternatief voor aardgasfornuizen met CCS, zowel voor gasvormig als voor vloeibaar transport.

Additioneel bevindt ook het **groengasfornuis** zich met een subsidie-intensiteit van 339/292/230 €/ton CO₂ in het Laag-/Midden-/Hoog-scenario binnen de bandbreedte van de CCS-technieken, maar is het nominaal niet kosteneffectiever.

Figuur 4 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van directe warmte.



Noot: Voor de RIFT boiler is dit een voorlopig resultaat.

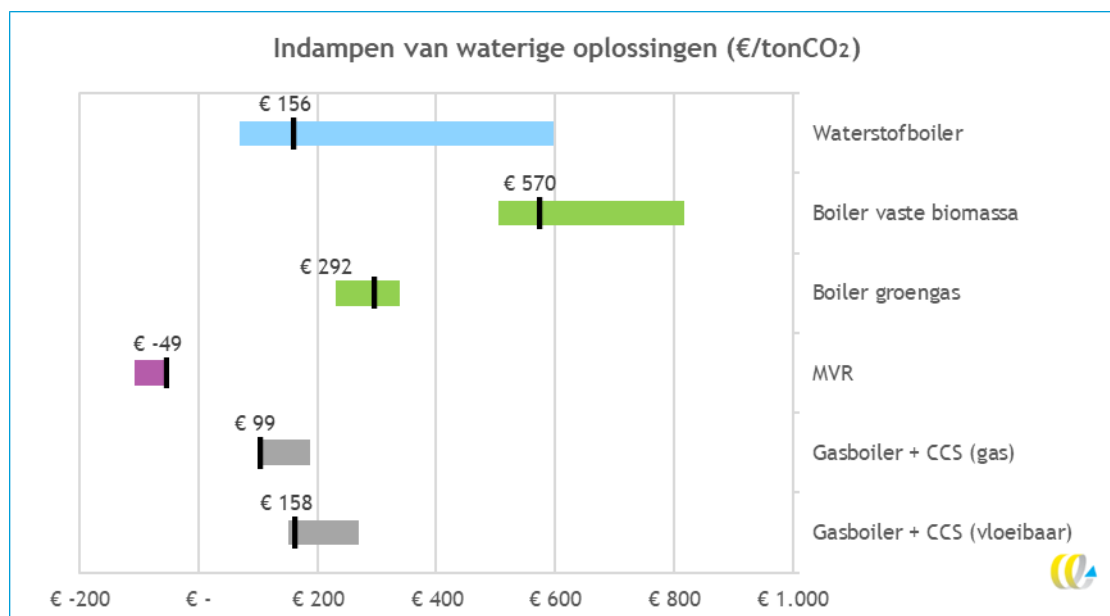
Noot 2: Voor het waterstoffornuis is de aanname dat deze groene waterstof als input neemt die geproduceerd is met een SDE++ gesubsidieerde elektrolyser. Het correctiebedrag is hier de lange-termijn waterstofprijs, welke de marktprijs van (grijze) waterstof representeert. Aangezien de elektrolyser dus al SDE++ subsidie heeft ontvangen, vindt er geen dubbeltelling plaats. Een categorie zoals de waterstoffornuis, die nu niet in de SDE++ regeling bestaat, zou iets soortgelijks wel als strikte voorwaarde moeten hebben om dubbele subsidie te voorkomen.

Als we het effect van de ETS-correctie buiten beschouwing laten dan zien we dat de subsidie-intensiteit van het waterstoffornuis ten opzichte van CCS (gas) is afgenomen en dat dit verschil voor het groengasfornuis is toegenomen. Het basisbedrag van het waterstoffornuis is gekoppeld aan de lange termijn (aard)gasprijs, die met circa 81 €/ton CO₂ (midden-waarde) is afgenomen ten opzichte van vorig jaar in het OT model. Hierdoor is de subsidie-intensiteit van het waterstoffornuis dit jaar veel lager.

3.3.4 Indampen van waterige oplossingen

Het indampen van waterige oplossingen gebeurt met een meertrapsverdampers, 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 verdampers. 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 resultaten voor het indampen van waterige oplossingen zijn weergegeven in Figuur 5.

Figuur 5 - Resultaten subsidie-intensiteit voor het indampen van waterige oplossingen



Noot: Voor de waterstofboiler is de aanname dat deze groene waterstof als input neemt die geproduceerd is met een SDE++ gesubsidieerde elektrolyser. Het correctiebedrag is hier de lange-termijn waterstofprijs, welke de marktprijs van (grijze) waterstof representeert. Aangezien de elektrolyser dus al SDE++ subsidie heeft ontvangen, vindt er geen dubbeltelling plaats. Een categorie zoals de waterstofboiler, die nu niet in de SDE++ regeling bestaat, zou iets soortgelijks wel als strikte voorwaarde moeten hebben om dubbele subsidie te voorkomen.

De MVR heeft met -54/-49/-57 €/ton CO₂ in het Laag-/Midden-/Hoog-scenario de laagste subsidie-intensiteit van alle beschouwde technieken voor het indampen van oplossingen. De overige technieken voor het indampen van waterige oplossingen zijn hetzelfde als voor de productie van stoom, zie Paragraaf 3.3.1. Deze blijven daarmee ook aantrekkelijk als alternatief voor de CCS-technieken.

De subsidie-intensiteit van MVR is beduidend lager dan die van de CCS-technieken. 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 de SDE als 'openlus-warmtepomp' met een rendement van 1.400% geproduceerde stoom per eenheid gebruikte elektriciteit.

De negatieve subsidie-intensiteiten voor MVR impliceren dat de kosten (c.q. het basis-bedrag) van de techniek in verhouding relatief lager liggen dan de marktwaarde of opbrengsten van de geproduceerde stoom en dat daarmee de verwachte subsidiebehoefte op termijn verdwijnt.

Ten opzichte van CCS met vloeibaar transport is nominaal ook de waterstofboiler kosten-effectiever voor het indampen van waterige oplossingen, al is het verschil minimaal en heeft de subsidie-intensiteit van de waterstofboiler een veel grotere onzekerheidsmarge.

3.3.5 Productie van waterstof

Voor de productie van waterstof is een bredere variëteit aan CCS-technieken behandeld. Ten opzichte van de studie van vorig jaar hebben we ook vloeibaar transport van CO₂ in de zeef meegenomen. De CCS-technieken 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.

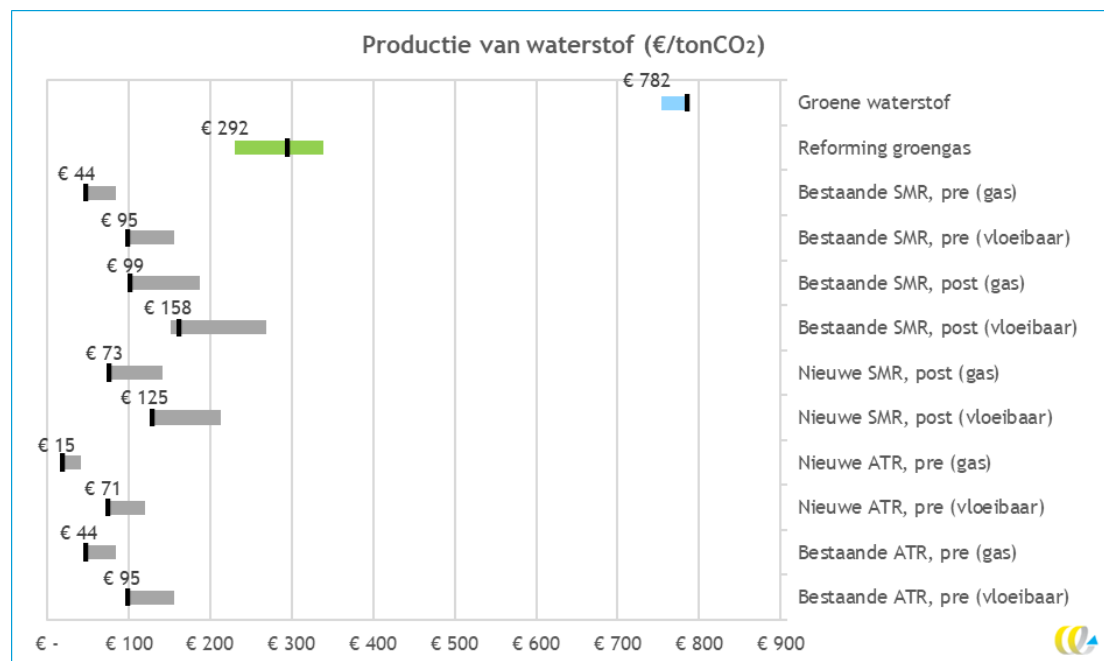
Figuur 6 geeft de resultaten weer voor de productie van waterstof. De CCS-alternatieven resulteren in een fors lagere subsidie-intensiteit vergeleken met groene waterstof, namelijk een subsidie-intensiteit die niet hoger dan 269 €/ton CO₂ is, en in veel gevallen nog een stuk lager ligt.

Voor de productie van waterstof zijn de duurzame alternatieven niet kosteneffectiever dan de fossiele processen met CCS. De productie van **groene waterstof** gaat gepaard met een subsidie-intensiteit van 755/782/753 €/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 productie van waterstof met groengas gaat gepaard met een subsidie-intensiteit van 339/292/230 €/ton CO₂ in het Laag-/Midden-/Hoog-scenario. De SMR op groengas is naar verhouding fors duurder dan de CCS-technieken met gasvormig transport omdat de kosten voor de productie van groengas veel hoger zijn dan de marktprijs van aardgas. CCS met vloeibaar transport zit wel binnen de bandbreedte van dit alternatief. Dat komt met name door de hoge(re) kosten voor het vloeibaar maken en vervolgens transporteren van CO₂. Los van het effect van de ETS-correctie is de subsidie-intensiteit van groene waterstof ten opzichte van vorig jaar afgenomen⁶ waardoor deze dichterbij de CCS-technieken komt.

⁶ Door lagere operationele kosten is de subsidie-intensiteit lager ten opzichte van vorig jaar, ondanks hogere investeringskosten en lagere opbrengsten door een lagere gasprijs (de langetermijnwaterstofprijs is immers gekoppeld aan de gasprijs in het OT-model).

Figuur 6 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van waterstof.



3.4 Conclusies

Uit Tabel 6 blijkt dat er voor alle processen kosteneffectievere duurzame alternatieven zijn voor CCS, met uitzondering van de productie van MT-/HT-stoom (voor gasvormige CCS) en de productie van waterstof. Bijvoorbeeld, voor de productie van LT-stoom is de HT-warmtepomp kosteneffectiever dan de gasboiler + CCS (gas en vloeibaar).

Maar als we de vertaling van de gasboiler + CCS (gas en vloeibaar) naar de bijbehorende SDE++-categorie maken, variant 5A (gasvormig) en 5B (vloeibaar), dan blijkt dat die SDE++-categorie voor CCS ook van toepassing kan zijn op de productie van waterstof, middels een bestaande SMR, post combustion. Aangezien we voor de productie van waterstof geen kosteneffectievere duurzame alternatieven hebben geïdentificeerd, kan deze CCS-categorie niet uitgesloten worden van SDE++-subsidie. CCS is hier nog steeds voor één proces (en voor gasvormige CCS voor twee processen) waarop deze categorie van toepassing is, de meest kosteneffectieve techniek, waardoor de categorie niet in zijn geheel kan worden uitgesloten.

In het geval dat er ook kosteneffectievere duurzame alternatieven waren voor waterstofproductie, dan had het beeld er anders uitgezien. Dan was er voor ieder proces waar CCS op toegepast zou kunnen worden, een duurzaam alternatief geweest dat voordeliger is om te subsidiëren dan CCS. Maar dit is dus niet het geval.

De conclusie is dus dat er geen CCS-categorie kan worden uitgesloten van SDE++-subsidie voor 2025, op basis van de resultaten van de zeefstudie.

Tabel 6 - Kosteneffectieve duurzame alternatieven voor CCS.

Proces	Fossiele referentietechniek	SDE++ categorie CCS	Kosteneffectief duurzaam alternatief
Productie van LT-stoom	Gasboiler + CCS (gas)	Variant 5A	HT-warmtepomp
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	HT-warmtepomp, Waterstofboiler
Productie van MT-/HT-stoom	Gasboiler + CCS (gas)	Variant 5A	-
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	Waterstofboiler
Productie van MT-/HT-directe warmte	Gasfornuis + CCS (gas)	Variant 5A	Waterstoffornuis
	Gasfornuis + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	Waterstoffornuis
Indampen van waterige oplossingen	Gasboiler + CCS (gas)	Variant 5A	MVR
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Variant 5B	MVR, waterstofboiler
Productie van waterstof	Bestaande SMR, pre (gas)	Variant 3A	-
	Bestaande SMR, pre (vloeibaar)	Variant 3B	-
	Bestaande SMR, post (gas)	Variant 5A	-
	Bestaande SMR, post (vloeibaar)	Variant 5B	-
	Nieuwe SMR, post (gas)	Variant 8A	-
	Nieuwe SMR, post (vloeibaar)	Variant 8B	-
	Nieuwe ATR, pre (gas)	Variant 7A	-
	Nieuwe ATR, pre (vloeibaar)	Variant 7B	-
	Bestaande ATR, pre (gas)	Variant 3A	-
	Bestaande ATR, pre (vloeibaar)	Variant 3B	-

4 Inbedding in breder beleid

4.1 Inleiding

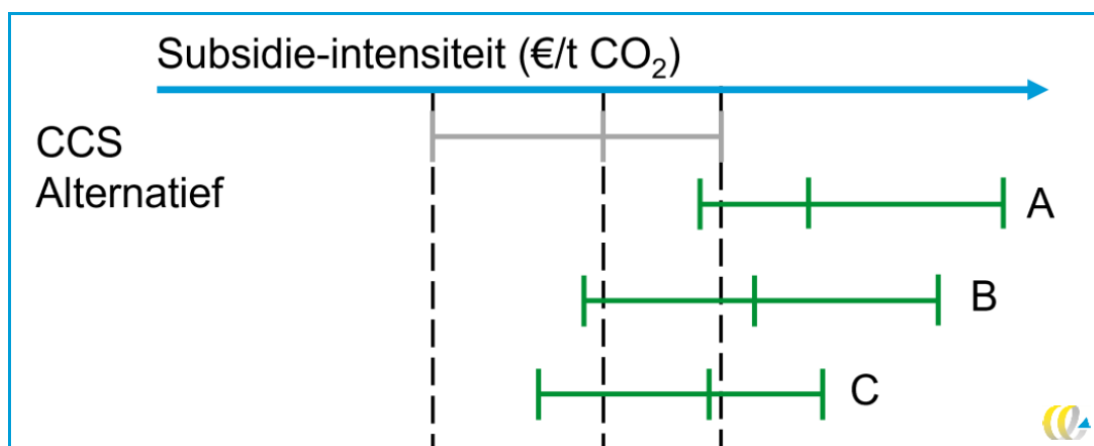
De laatste stap uit onze methode (Stap 4) bestaat uit een bredere beleidsanalyse van de resultaten van de zeef. De rationale achter deze analyse is dat er, naast kosteneffectiviteit, ook andere aspecten een rol hebben in de mate waarin een duurzame techniek echt een alternatief vormt voor CCS. Deze aspecten kan het ministerie meenemen in de besluitvorming over eventuele uitsluiting van SDE++-subsidie (zou dat aan de orde zijn). Ook kan deze informatie input leveren voor het bredere industrie- en innovatiebeleid. Bijvoorbeeld door veelbelovende technieken extra te stimuleren of specifieke belemmeringen aan te pakken.

In lijn met onze methode passen we de nadere analyse toe op technieken die al even kosteneffectief of kosteneffectiever zijn dan CCS én technieken die hierbij in de buurt komen. Dit wordt nader toegelicht in de volgende paragraaf. In Paragraaf 4.3 geven we vervolgens de analyse schematisch weer via een stoplichtsysteem voor verschillende beleidsaspecten en in Paragraaf 4.4 lichten we de analyse nader toe.

4.2 Selectie van kansrijke alternatieven

Conform onze methode (CE Delft, 2022a) selecteren we kansrijke alternatieven voor de nadere analyse op basis van de (bandbreedte van de) kosteneffectiviteit. In de methode hebben we voorgesteld om, naast alternatieven die dezelfde, een betere of vergelijkbare kosteneffectiviteit hebben ten opzichte van CCS, te kijken naar alternatieven waarvan de middenwaarde van de geschatte subsidie-intensiteit binnen de bandbreedte van de subsidie-intensiteit van CCS ligt. Dit komt overeen met de alternatieven van type C in Figuur 7.

Figuur 7 - Schematische weergave van de bandbreedte van de subsidie-intensiteit van CCS en verschillende duurzame alternatieve technologieën (A, B en C)



Op basis van deze methode zijn er een aantal overlappende duurzame alternatieven geïdentificeerd. In Tabel 7 staat per proces en fossiele referentietechniek, welk duurzaam alternatief aan type C overlap in Figuur 7 voldoet. Dit komt neer op de ‘waterstofboiler voor de processen ‘LT stoom’, ‘MT-/HT-stoom’ en ‘Indampen van waterige oplossingen’.

Tabel 7 - Overzicht overlappende duurzame alternatieven per proces en fossiele referentietechniek

Proces	Fossiele referentietechniek	Overlappend duurzaam alternatief
Productie van LT-stoom	Gasboiler + CCS (gas)	Waterstofboiler
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Waterstofboiler
Productie van MT-/HT-stoom	Gasboiler + CCS (gas)	Waterstofboiler
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Waterstofboiler
Productie van MT-/HT-directe warmte	Gasfornuis + CCS (gas)	-
	Gasfornuis + CCS (vloeibaar)	-
Indampen van waterige oplossingen	Gasboiler + CCS (gas)	Waterstofboiler
	Gasboiler + CCS (vloeibaar)	Waterstofboiler
Productie van waterstof	Bestaande SMR, pre (gas)	-
	Bestaande SMR, pre (vloeibaar)	-
	Bestaande SMR, post (gas)	-
	Bestaande SMR, post (vloeibaar)	-
	Nieuwe SMR, post (gas)	-
	Nieuwe SMR, post (vloeibaar)	-
	Nieuwe ATR, pre (gas)	-
	Nieuwe ATR, pre (vloeibaar)	-
	Bestaande ATR, pre (gas)	-
	Bestaande ATR, pre (vloeibaar)	-

De boiler op waterstof heeft overlap met alle fossiele referentietechnieken waar hij mee vergeleken wordt.

We concluderen dat de nadere analyse in deze stap wordt uitgevoerd op alle alternatieven die al kosteneffectiever zijn (zie Tabel 6) en op de alternatieven waarbij de kosteneffectiviteit overlap vertoont met die van CCS, volgens de tabel hierboven.

4.3 Nadere analyse van overige (beleids)aspecten

We analyseren op kwalitatieve wijze of de aspecten die we in onze methodiek hebben geïdentificeerd relevant zijn voor CCS en voor de duurzame alternatieven die we in de analyse meenemen. Vervolgens gaan we nader in op de relevante aspecten, en hoe deze een voordeel of juist een nadeel vormen van toepassing van de betreffende technologie. In Tabel 8 is samenvattend weergegeven op welke manier de verschillende aspecten relevant kunnen zijn voor de zes technieken die we beschouwen. Met kleurcodes is aangegeven of het om een (relatief) voordeel of een (relatief) nadeel gaat. Onder de tabel volgt een beschrijvende analyse van hoe de (beleids)aspecten uitpakken voor elke techniek. De reformer op groengas zit niet in de tabel omdat deze verder technisch identiek is aan de fossiele referentietechniek, de overige beleidsaspecten zitten in lijn met de groengas boiler/fornuis.

Tabel 8 - Relevantie van de verschillende aspecten van de nadere analyse van CCS en zes geselecteerde duurzame alternatieven

Aspect Technologie	CCS	MVR	HT-warmte-pomp	GG boiler	GG fornuis	H ₂ -boiler	H ₂ -fornuis
Bandbreedte subsidie-intensiteit	Relatief kleine bandbreedte	Relatief kleine bandbreedte	Relatief grote bandbreedte	Relatief grote bandbreedte	Relatief grote bandbreedte	Grote bandbreedte, kosten onzeker	Grote bandbreedte, kosten onzeker
Beschikbaarheid infrastructuur	CO ₂ -infra vaak nog niet aanwezig	Mogelijk nieuwe aansluiting nodig	Netcongestie	Transport biomassa kan per schip/spoor/weg	Transport biomassa kan per schip/spoor/weg	Transport H ₂ kan per schip/spoor/weg/pijplijn	Transport H ₂ kan per schip/spoor/weg/pijplijn
Beschikbaarheid grondstoffen	-	-	Elektriciteit niet 100% groen	Beschikbaarheid biomassa beperkt	Beschikbaarheid biomassa beperkt	H ₂ niet 100% groen	H ₂ niet 100% groen
Milieueffecten incl. ketenemissies	Fossiele keten behouden; stikstof-uitstoot	Uitstoot naar de omgeving nihil	Uitstoot naar de omgeving nihil; stikstofuitstoot of elektriciteitsinfra	Stikstofuitstoot	Stikstofuitstoot	Uitstoot naar de omgeving nihil	Uitstoot naar de omgeving nihil
Ruimte-effecten	Ruimte compressorstation; Leidingen ondergronds	-	Extra elektriciteitsinfra	(Buitenlands) landgebruik	(Buitenlands) landgebruik	Potentieel H ₂ -opslag	Potentieel H ₂ -opslag
Maatschappelijk draagvlak	Publieke opinie	-	-	Draagvlak duurzaamheid biomassa	Draagvlak duurzaamheid biomassa	H ₂ -prijs, publieke opinie	H ₂ -prijs, publieke opinie
Overige beleidsdoelen	CCS is tijdelijke oplossing; Doelstelling circulaire economie en kabinetsvisie fossielvrije toekomst	Bijdrage doelen voor energie-besparing	Bijdrage doelen voor energie-besparing	Biodiversiteit, concurrentie met andere toepassingen voor duurzame biomassa	Biodiversiteit, concurrentie met andere toepassingen voor duurzame biomassa	-	-

Aspect Technologie	CCS	MVR	HT-warmte-pomp	GG boiler	GG fornuis	H ₂ -boiler	H ₂ -fornuis
Geopolitieke aspecten, waaronder energie-zekerheid	Concurrentie opslag-capaciteit; Afhanke-lijkheid fossiele energie.	Energiezekerheid: elektriciteit kan binnen EU opgewekt worden; gas-besparingen	Energiezekerheid: elektriciteit kan binnen EU opgewekt worden; gas-besparingen	Biomassaproductie NL onvoldoende.	Biomassaproductie NL onvoldoende.	Groene H ₂ mogelijk elders geproduceerd	Groene H ₂ mogelijk elders geproduceerd
Technologie-specifieke belemmeringen	CO ₂ -opslagpotentieel heeft tijd nodig om geëxploiteerd te kunnen worden*,-.	-	Inpassen in proces is vaak lastig	-	-	PFAS-gebruik in elektrolyzers	PFAS-gebruik in elektrolyzers

Groen = relatief voordeel; geel = beperkt relatief nadeel; oranje = relatief nadeel.

* Eerste analyse tot start bouw CCS/injectiefaciliteiten: 5-7 jaar bij lege olie- en gasvelden. Minimaal 9 jaar bij zoutwatervoerende lagen (CE Delft, 2023a).

4.4 Toelichting bij de analyse van beleidsaspecten

CCS

In Paragraaf 3.3 zijn de subsidie-intensiteiten van een variëteit aan technieken weergegeven. Uit de resultaten voor de verschillende industriële processen blijkt dat de bandbreedte van de subsidie-intensiteit voor CCS relatief gering is ten opzichte van de duurzame alternatieven. De CCS-technieken zijn daarmee relatief stabiel bij een verandering van scenario.

De benodigde **infrastructuur** voor een CCS-project is vaak nog niet aanwezig. Hoewel in sommige gevallen gedeeltelijk gebruik kan worden gemaakt van bestaande leidingen, zijn voor CCS over het algemeen nieuw aan te leggen pijpleidingen nodig (CE Delft, 2023b).

Porthos en Aramis zijn grootschalige CCS-projecten in Nederland die bijdragen aan de reductie van industriële uitstoot. Vanaf 2026 is de prognose dat Porthos operationeel zal zijn waarmee 2.5 miljoen ton CO₂ per jaar kan worden opgeslagen in lege gasvelden onder de Noordzee (Porthos, 2021). Ook Aramis, waarvan de verwachting is dat deze per 2029 wordt opgestart en opschaaft naar het afvangen van 22 Mtpa⁷ vanaf 2030 (Aramis, 2024). Omdat de aanleg van CCS infrastructuur gepaard gaat met (tijdelijke) stikstofuitstoot is op dit moment onduidelijk op welke termijn de infrastructuur die noodzakelijk is voor grootschalige CCS-projecten in Nederland gerealiseerd kan worden.

Wat betreft **milieueffecten** geeft CCS een gemengd beeld. De uitstoot van stikstof en fijnstof door de installatie zelf neemt af omdat een deel hiervan wordt meegenomen bij het afvangen van de CO₂, of naar lagere niveaus moet worden gebracht ten behoeve van het CO₂-afvangproces zelf. Aan de andere kant kan de toepassing van CCS bijdragen aan de langere instandhouding van fossiele productieketens.

⁷ In de eerste fase van het Aramis-project zal een transport- en opslagcapaciteit van 7,5 Mtpa wordt gerealiseerd (TotalEnergies et al., 2023).

Dit leidt op meerdere manieren tot blijvende CO₂-uitstoot: niet alle CO₂ kan worden afgevangen bij een CCS-installatie; verder in de keten blijven de koolstofemissies bestaan, zoals transportemissies bij het vervoeren van fossiele brand- en grondstoffen en methaanlekages; daarnaast is er voor CCS veel elektriciteit nodig, die nu vaak nog fossiel wordt opgewekt (CE Delft, 2018, 2023b). Vanuit technisch perspectief is volledige CO₂-afvang bij schoorsteenemissies wel mogelijk, echter zal het een economisch knelpunt vormen om daadwerkelijk alle CO₂ te verwijderen.

Het **ruimte-effect** van CCS is beperkt, omdat de pijpleidingen grotendeels ondergronds lopen. Wel is er ruimte nodig voor compressorstations (ca. 5-7 ha bij opslag van 7-8 Mton/jaar) (CE Delft, 2023b; EBN & Gasunie, 2018).

Het **maatschappelijk draagvlak** onder het algemene publiek voor CCS is neutraal tot licht positief (Broecks et al., 2021). Sommige ngo's op milieugebied in Nederland zijn geen voorstander van CCS. De weerstand onder burgers neemt af op het moment dat het om offshore CCS gaat (in tegenstelling tot CCS op land) en CCS niet wordt toegepast bij kolencentrales (CE Delft et al., 2018).

Er zijn voor CCS geen specifieke grondstoffen of onderdelen uit niet-EU landen nodig, dus in die zin is CCS als techniek een relatief veilige optie. Aan de andere kant blijven de industrieën die CCS willen toepassen juist wel afhankelijk van fossiele brandstoffen, waarvan de beschikbaarheid en prijs sterk beïnvloed wordt door **de geopolitiek**.

Ook zou er op termijn in Europa concurrentie om opslagcapaciteit kunnen ontstaan, omdat de beschikbaarheid daarvan vooralsnog beperkt lijkt en niet gelijk over de EU-lidstaten verdeeld is (CO2GeoNet, 2021). De beperkte beschikbaarheid van ontwikkelde opslaglocaties kan tot slot ook worden beschouwd als **een technologie-specifieke belemmering** voor CCS.

Mechanical Vapor Recompression (MVR)

Voor het indampen van waterige oplossingen blijkt uit Figuur 5 dat de **bandbreedte van de subsidie-intensiteit** voor MVR ruim lager ligt ten opzichte van de fossiele referentietechnieken. De negatieve subsidie-intensiteiten voor MVR impliceren dat de kosten (c.q. het basisbedrag) van de techniek in verhouding relatief lager liggen dan de marktwaaarde of opbrengsten van de geproduceerde stoom en dat daarmee de verwachte subsidiebehoefte op termijn verdwijnt.

Voor MVR is geen specifieke **infrastructuur** benodigd. De installatie heeft wel een elektriciteitsaansluiting. Wanneer er gebruik wordt gemaakt van duurzaam opgewekte elektriciteit dan zijn de **milieueffecten** van een dergelijke technologie nihil.

Omdat MVR met een COP van 14 een zeer efficiënte techniek is vormt het niet alleen een duurzaam alternatief, maar leidt het ook tot energiebesparing (Berenschot et al., 2017; Energy.nl, 2018; Klop, 2015). De technologie draagt daarmee bij aan **beleidsdoelen** (nationaal en Europees) op het gebied van energiebesparing en versterkt de **energie-zekerheid** in Europa, omdat de afhankelijkheid van gas afneemt en de vraag naar hernieuwbare elektriciteit binnen Europa toeneemt en ook kan worden opgewekt.

Hogetemperatuur warmtepomp

Uit Figuur 2 blijkt dat de **bandbreedte van de subsidie-intensiteit** voor de hogetemperatuurwarmtepomp nog een relatief grote spreiding laat zien. Ten opzichte van de zeef studie vorig jaar is deze wel significant afgenomen (CE Delft, 2024). Dat impliceert dat de HT-warmtepomp niet alleen kosteneffectiever blijkt te worden, maar ook rendabeler in zoverre de kostprijs van de techniek en de (langtermijn)prijs van de geproduceerde stoom.

Net als voor MVR is voor een HT-warmtepomp (hernieuwbare) elektriciteit nodig, maar vanwege het lagere rendement is de extra elektriciteitsvraag hier veel groter. In termen van benodigde **infrastructuur** kan de netcongestie op het elektriciteitsnet daarom een serieuze uitdaging vormen voor deze technologie, afhankelijk van de locatie. **Milieutechnisch** zal de HT-warmtepomp bij gebruik van grijze elektriciteit wel sprake zijn CO₂-uitstoot en bij hernieuwbare elektriciteit nagenoeg niet. Er zal dan wel enige (tijdelijke) stikstofuitstoot plaatsvinden bij de aanleg van benodigde infrastructuur, dat werkt eveneens door in de benodigde **ruimte** voor deze techniek.

Omdat een warmtepomp efficiënter is dan bijvoorbeeld een gasboiler draagt deze oplossing ook bij aan **beleidsdoelen** op het gebied van energiebesparing en **energiezekerheid**. Inpassing in het eigen productiesysteem vergen daarnaast investeringen en proces specifieke kennis die **belemmeringen** kunnen zijn.

Groengasboiler/fornuis

De **bandbreedte in de subsidie-intensiteit** van een boiler of fornuis op basis van groengas is relatief groot, vergelijkbaar maar minder groot ten opzichte van de HT-warmtepomp (zie Paragraaf 3.3). 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 en zijn daarom samengenomen in deze analyse. Voor het vervoer van groengas zijn meerdere bestaande opties mogelijk, zoals het gebruik van bestaande aardgasleidingen of vloeibaar transport per schip. Er hoeft dus geen specifieke **infrastructuur** voor te worden aangelegd. Als we meer upstream de keten in gaan en biomassa overwegen dan zijn weg- en spoorverkeer ook additionele vervoersopties. Wel kan het vervoer van biomassa zelf uiteraard (transport)emissies met zich meebrengen.

De **beschikbaarheid** van (duurzame) biomassa is een van de grote knelpunten bij deze technologieën. Er is meer vraag naar duurzame biomassa dan aanbod, mede afhankelijk van de manier waarop duurzame biomassa wordt gedefinieerd, en er is dus een raamwerk nodig om te bepalen welke economische activiteiten aanspraak kunnen maken op de beschikbare biomassa. Welke biomassa als duurzaam geldt wordt vooral bepaald door wetgeving op EU-niveau, met name de (herziene) Richtlijn Hernieuwbare Energie (REDII) (RVO, 2023).

Het gebruik van biomassa als energiedrager brengt **milieu- en ruimte effecten** met zich mee:

- bij de verbranding komt niet alleen CO₂ vrij, maar ook stikstofoxiden en fijnstofuitstoot;
- transportemissies bij het vervoeren van biomassa van de bron naar de productiefaciliteit belasten het milieu eveneens;
- door conversie van land ten behoeve van biomassagebruik vindt er degradatie van ecosystemen plaats waardoor onder andere bossen en biodiversiteit worden aangetast (SER, 2020);
- de (huidige) biomassaproductie heeft een impact op het landgebruik en heeft daarmee ook een significant ruimte-effect.

Het **maatschappelijk draagvlak** van technieken die afhankelijk zijn van biomassa wankelt door de bovengenoemde milieu- en ruimte effecten. Tevens staat het gebruik van biomassa als energiedrager onder druk doordat er twijfel is over de duurzaamheid van dergelijke toepassingen.

De productie van biomassa eindig en is het de vraag wat dat betekent voor de **geopolitieke verhoudingen**. In Nederland is onvoldoende biomassa beschikbaar om een volwaardige biobased economy op te zetten (CE Delft, 2022b, 2023c). Import van biomassa zal dan bij een toename van de vraag moeten worden gefaciliteerd. Op EU-niveau zal er wel voldoende biomassa beschikbaar zijn om in ieder geval in de Nederlandse behoefte te voorzien. Nederland zal daardoor wel claim moeten leggen op het aanbod van biomassa uit andere landen.

Waterstofboiler/fornuis

De **bandbreedte in de subsidie-intensiteit** van een boiler of procesfornuis op basis van (groene) waterstof is zeer groot, zie Paragraaf 3.3. De grote bandbreedte impliceert dan de kosten voor deze technologieën erg volatiel en onzeker zijn. De invloed van hoge energieprijzen werkt door in de berekening van de subsidie-intensiteit.

Wat betreft **infrastructuur** kan een waterstofboiler/fornuis gebruikmaken van het bestaande netwerk aan aardgasleidingen en daar waar nodig worden uitgebouwd of aangepast voor waterstoftransport (Gasunie, 2020). Lokale waterstofproductie kan ook worden gerealiseerd, maar is erg afhankelijk van beschikbare aansluitcapaciteit op het elektriciteitsnet.

De **milieueffecten** bij het gebruik van hernieuwbare waterstof in waterstofboilers en fornuizen zijn nagenoeg nihil. Bij de verbranding van waterstof vindt er geen CO₂-uitstoot plaats, maar komen er wel stikstofoxiden vrij.

Wat betreft het **ruimte-effect** van waterstofboiler- en fornuisinstallaties wordt er geen significant groter beslag gelegd op ruimtegebruik ten opzichte van conventionele gasboilers- en fornuizen. Echter zal in het geval van waterstofopslag in tanks of waterstofproductie-faciliteiten zoals elektrolyzers wel beslag worden gelegd op beschikbare ruimte.

Over het algemeen lijkt er **maatschappelijk draagvlak** te zijn voor het gebruik van (groene) waterstof, al is er binnen de publieke opinie nog wel sprake van een kennislacune en onzekerheid over de 'nieuwe' energiedrager. Een goede informatievoorziening naar het publiek toe en speciale aandacht voor veiligheidsvoorzieningen voor mens en omgeving zijn daarbij onmisbaar (Nationaal Waterstof Programma, 2022). Verder is ook de waterstofprijs bepalend in hoeverre er maatschappelijk draagvlak te vinden is. Momenteel is de prijs van groene waterstof hoger dan die van andere alternatieven en dat kan weerstand oproepen.

Omdat hernieuwbare elektriciteit in Europa structureel duurder is dan in andere delen van de wereld, wordt er steeds meer gekeken naar de mogelijkheden om **groene waterstof elders te produceren** en (via omzetting in H₂-houdende producten zoals methanol of ammoniak) naar Europa te vershippen. Dit zou echter nieuwe importafhankelijkheden met zich meebrengen. Ook zijn er risico's voor de energiezekerheid in de derde landen waar de waterstof geproduceerd gaat worden, bijvoorbeeld op het gebied van watergebruik of de beschikbaarheid van duurzame elektriciteit voor de bevolking zelf (Caiafa et al., 2024).

Een specifieke **technologische belemmering** is dat in sommige typen elektrolyzers nu PFAS wordt gebruikt, waarvoor vanwege de milieurisico's een alternatief moet worden gevonden.

5 Conclusies

5.1 Hoofdconclusie

In dit rapport hebben we onze herziene zeefmethodiek (CE Delft, 2022a) toegepast met het oog op de SDE++-subsidieronde van 2025. De zeef is bedoeld om vast te stellen of er kosten-effectieve alternatieve technieken voor CCS beschikbaar zijn die binnen een vergelijkbare termijn gerealiseerd kunnen worden. Als dat het geval is voor alle processen waarvoor een bepaalde SDE++-categorie voor CCS van toepassing is, kan deze categorie door het ministerie worden uitgesloten van SDE++-subsidie.

Onze conclusie is dat we voor een groot aantal processen een duurzame alternatieve techniek hebben gevonden, maar niet voor de productie van MT-/HT-stoom (voor gas-vormige CCS) en de productie van waterstof. Met name voor waterstofproductie is een kosteneffectief duurzaam alternatief voorlopig niet in zicht. Daarom kan er op basis van de zeef niet een SDE++-categorie voor CCS worden uitgesloten van de SDE++-subsidieronde van 2025.

5.2 Beschouwing op de resultaten

Resultaten kosteneffectiviteit

De resultaten van de vergelijking van de kosteneffectiviteit tussen CCS-technieken en duurzame alternatieven vallen gunstiger uit voor de duurzame alternatieven dan de afgelopen jaren. Dit heeft echter niet alleen te maken met een plotselinge kostendaling voor deze alternatieven⁸, maar vooral met een wijziging in de berekening van de subsidie-intensiteit binnen het OT-model van het PBL voor 2025, waar wij ons in dit rapport op baseren. In eerdere jaren werd het ETS-voordeel, dat ontstaat als er geen ETS-rechten meer hoeven te worden betaald voor CO₂-emissies, wel meegenomen in de berekening van de subsidie-intensiteit voor CCS-technieken, maar niet voor die van de duurzame alternatieven. Dit is in het

OT-model voor 2025 gewijzigd: het ETS-voordeel wordt nu, samen met enkele andere correcties, verwerkt in de berekening van de subsidie-intensiteit voor alle technieken.

Hoewel de verschuiving in de resultaten dus het gevolg is van een wijziging in de berekening, en niet van een wijziging in de werkelijke situatie, betekent dit dat er een rooskleuriger beeld ontstaat van de mate waarin duurzame alternatieven zich qua kosteneffectiviteit kunnen meten met CCS. Naast MVR, dat vorig jaar al als kosteneffectiever dan CCS uit de bus kwam, zijn voor sommige processen ook een HT-warmtepomp, een waterstoffornuis en een waterstofboiler kosteneffectiever. Voor die laatste twee is dat mogelijk omdat de onrendabele top van het gebruik van groene waterstof via subsidie wordt aangevuld.

⁸ Van sommige alternatieven is ook los van de wijziging in de berekening de subsidie-intensiteit lager geworden ten opzichte van die van CCS, zoals de productie van groene waterstof en de hogetemperatuurwarmtepomp. Voor andere alternatieven, bijvoorbeeld het groengasfornuis, is de subsidie-intensiteit juist gestegen als het effect van de nieuwe berekeningsmethode niet wordt meegenomen.

Voor de productie van waterstof zelf blijven duurzame alternatieven (groene waterstof) echter een stuk duurder dan productie op basis van aardgas met CCS (blauwe waterstof).

De SDE++ werkt niet op basis van processen maar op basis van technieken (SDE++-categorieën). Dit zorgt ervoor dat zolang duurzame productie van waterstof erg duur blijft, er via de zeef nooit een SDE++-categorie van subsidie kan worden uitgesloten, zelfs al is er voor alle andere processen een kosteneffectief duurzaam alternatief.

Dit roept de vraag op hoe zinvol het is om de zeef de komende jaren op dezelfde manier te blijven toepassen. Het identificeren van kosteneffectievere alternatieven voor andere processen dan de productie van waterstof is immers op zichzelf ook wel zinvol, maar zal in deze situatie niet snel leiden tot een concreet gevolg voor de toekenning van de SDE++-subsidie, waarmee het nut en de effectiviteit van de zeef beperkt blijven.

Wij zijn er dan ook voorstander van om in een nadere herziening van de zeefmethodiek in 2025 breder te kijken naar het doel van de zeef, de andere inperkingen die er aan subsidie voor CCS zijn gelegd, en de rol van CCS in het bredere industrie- en verduurzamingsbeleid. Concreet kan er bijvoorbeeld worden gekeken of het mogelijk is om voor de volgende SDE++-ronde beperkingen op te leggen aan subsidie voor CCS voor bepaalde routes of processen, ook al kan er geen volledige CCS-categorie van subsidie worden uitgesloten. In deze context is het ook belangrijk om een sterkere link te leggen met de praktijk, door na te gaan in welke sectoren en voor welke processen CCS daadwerkelijk wordt overwogen en de zeef nadrukkelijker op deze sectoren en processen te richten.

Resultaten nadere beleidsanalyse

Tot slot hebben we een aantal beleidsaspecten (anders dan kosteneffectiviteit) kwalitatief bekeken voor een selectie van duurzame alternatieve technieken, in vergelijking met CCS. We doen dit omdat ook andere aspecten, zoals de beschikbaarheid van de juiste infrastructuur of eventuele negatieve milieueffecten, bepalen of een duurzame techniek ook in de praktijk echt een alternatief kan zijn voor CCS.

Het grootste risico van **CCS** zelf is dat de toepassing van CCS kan bijdragen aan de langere instandhouding van fossiele productieketens. Dit leidt op meerdere manieren tot blijvende CO₂-uitstoot. Ook de importafhankelijkheden van fossiele brandstoffen blijven hiermee bestaan.

Voor de **HT-warmtepomp** (en andere elektrificatietechnieken) komt netcongestie als belemmering sterk naar voren. Hoewel we dit in onze analyse van twee jaar geleden ook al aangaven, is duidelijk dat netcongestie een steeds groter probleem aan het worden is voor bedrijven, en elektrificatie in veel gevallen op korte termijn al niet meer als een praktisch realiseerbaar alternatief kan worden gezien. Het is wel een oplossing die meestal niet alleen tot emissiereductie van broeikasgassen, maar ook tot energiebesparing leidt en daarmee tot secundaire emissiereductie zolang het elektriciteitsnetwerk nog niet fossielvrij is.

Voor de **alternatieven die gebaseerd zijn op groengas** is de beschikbaarheid van biomassa als grondstof voor het groengas het belangrijkste aandachtspunt. De vraag naar duurzame biomassa zal in de toekomst toenemen omdat veel sectoren biomassa als een belangrijke alternatieve brandstof of grondstof zien. Dit brengt zorgen over (veranderend) landgebruik met zich mee. Verder zorgt de verbranding van groengas nog steeds voor uitstoot van fijnstof, stikstofverbindingen en andere luchtvervuilende elementen. De schaal van de toepasbaarheid van alternatieven op groengas is daarmee een onzekere factor.

De alternatieven die gebruik maken van waterstof hebben, naast de hoge prijs van groene waterstof, ook last van de onzekerheid over die prijs in de toekomst, wat het lastig maakt om investeringsbeslissingen te nemen. Veel initiatieven die een waterstofeconomie zouden moeten stimuleren zijn de afgelopen jaren niet doorgezet. Omdat hernieuwbare elektriciteit in Europa structureel duurder is dan in andere delen van de wereld, wordt er steeds meer gekeken naar de mogelijkheden om groene waterstof elders te produceren en (via omzetting in H₂-houdende producten zoals methanol of ammoniak) naar Europa te verschepen. Dit zou echter nieuwe importafhankelijkheden met zich meebrengen. Waterstof kan de hoge verwachtingen als verduurzamingsrichting voor de industrie daarmee voorlopig niet waarmaken.

Literatuurlijst

- AACE International. (2020). *AACE International Recommended Practice No. 56R08 - Cost Estimate Classification System*.
- Aramis. (2024). About the Aramis Project. In: Aramis.
- Berenschot, CE Delft, Industrial Energy Experts, & Energy Matter. (2017). *Electrification in the Dutch process industry, Utrecht: Berenschot*.
- Broecks, K., Jack, C., Mors, E.t., Boomsma, C., & Shackley, S. (2021). How do people perceive carbon capture and storage for industrial processes? Examining factors underlying public opinion in the Netherlands and the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102236>
- Caiafa, C., Romijn, H., & De Coninck, H. (2024). Identifying opportunities and risks from green hydrogen: a framework and insights from a developing region in Brazil. *Climate Policy*, 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2407848>
- CE Delft. (2018). *Screening LCA for CCU routes connected to CO2 Smart Grid*.
- CE Delft. (2022a). *Herziening zeefmethodiek CCS voor SDE++*.
- CE Delft. (2022b). *Maatschappelijke waarde groengas. Casussen voor mobiliteit, industrie en gebouwde omgeving*.
- CE Delft. (2023a). *Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid: Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland*.
- CE Delft. (2023b). *Kosteneffectieve alternatieven voor CCS. Uitwerking van de 'zeef' ten bate van de SDE++-subsidieronde voor 2023*.
- CE Delft. (2023c). *Verkenning van een fossielvrije industrie. Productie binnen het carbonbudget*.
- CE Delft. (2024). *Actualisatie zeefstudie voor SDE++-subsidieronde 2024. Kosteneffectieve alternatieven voor CCS*.
- CE Delft, De Gemeynt, & Margriet Kuijper Consultancy. (2018). *Routekaart CCS*.
- CO2 Value Europe. (lopend). *CCU Projects Database*. CO2 Value Europe. <https://database.co2value.eu/>
- CO2GeoNet. (2021). *State-of-play on CO2 geological storage in 32 European countries - an update*.
- Coolbrook. (2024). *Industrial Process Heating: Replacing Fossil Fuels with RotoDynamic Heater*. Coolbrook. <https://coolbrook.com/electrification-solutions/rdh-industrial-process-heating/>
- EBN, & Gasunie. (2018). *Transport en opslag van CO₂ in Nederland : Verkennende studie*.
- Emissieregistratie. (lopend). *Emissieregistratie: Nationale Broeikasgasemissies volgens IPCC (1990 t/m 2017, vastgesteld in januari 2019, 2018*: voorlopige cijfers vastgesteld in juli 2019)*. Emissieregistratie. <https://www.emissieregistratie.nl/>
- Energy.nl. (2018, 5 28). *Industrial mechanical vapour recompression (MVR) Factsheet*. Energy.nl. <https://energy.nl/wp-content/uploads/2019/06/Industrial-mechanical-vapour-recompression-1.pdf>
- Gasunie. (2020). *Waterstofbackbone Gasunie*.
- Klop, E. (2015). *Steaming ahead with MVR. Cogeneration and On-site Power Production (COSPP)*. <https://blueterra.nl/wp-content/uploads/2018/03/Steaming-ahead-with-MVR-COSPP.pdf>
- Nationaal Waterstof Programma. (2022). *Routekaart Waterstof*.
- North Sea Port. (2022). *ArcelorMittal huldigt in North Sea Port baanbrekend Steelanol-project in voor koolstofafvang en -gebruik*. North Sea Port. <https://www.northseaport.com/arcelormittal-huldigt-in-north-sea-port-baanbrekend-steelanol-project-in-voor-koolstofafvang-en-gebruik>



- PBL. (2021). *MIDDEN database*.
- PBL. (2024). *Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2024*.
- Porthos. (2021, mei 5). *Porthos CO2 Transport & Storage : Project*. Porthos Development C.V. <https://www.porthosco2.nl/en/project/>
- Rijksoverheid. (2019). *Klimaatakkoord*.
- RVO. (2023). *Verificatieprotocol duurzaamheid biomassa - Aantonen van REDII-duurzaamheid voor SDE en EU-ETS*.
- RVO. (2024). *SDE++ 2024 - Openstelling 2024*.
- RWE. (2023). *RWE's BECCUS project levert met emissiereductie en koolstofverwijdering cruciale bijdrage aan klimaatneutraal elektriciteitssysteem in Nederland*. RWE. <https://benelux.rwe.com/pers/2023-06-20-beccus-project-levert-met-emissiereductie-en-koolstofverwijdering-cruciale-bijdrage/>
- Schyns, V. (2022). *Aluminiumfabriek Aldel failliet vanwege hoge energieprijzen*. NRC. <https://www.nrc.nl/nieuws/2022/10/27/aluminiumfabriek-aldel-failliet-vanwege-hoge-energieprijzen-a4146523>
- SER. (2020). *Biomassa in balans : Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen*.
- TotalEnergies et al. (2023, september 2023). *Aramis brochure*. TotalEnergies, Shell, Energie Beheer Nederland (EBN) en Gasunie. https://www.aramis-ccs.com/files/Aramis-brochure_20230928_NL_digitaal.pdf
- Verhagen, M. (2024, 04-12-2024). *Interview met RIFT CEO Mark Verhagen over de ijzerbrandstofboiler*. [Interview]. <https://www.ironfueltechnology.com/>



Longlist bedrijven

Tabel 9 - De bedrijven die in enig jaar van 2020, 21, 22 meer dan 30 kton CO₂ hebben uitgestoten. (NEA)

Sbi_naam	Bedrijf	Max uitstoot tCO ₂ /jaar
Aardolieraffinage	Shell Nederland Raffinaderij BV	4.392.689
	Esso Nederland BV (Raffinaderij Rotterdam)	2.733.803
	BP Rotterdam Refinery	2.117.592
	Zeeland Refinery N.V.	1.592.627
	Gunvor Petroleum Europoort B.V.	233.246
	VPR Energy B.V.	129.029
	Biopetrol Rotterdam BV	33.328
Behandeling van onschadelijk afval	AVR NV (Rijnmond)	1.942.397
	Afval Energie Bedrijf (Amsterdam)	1.306.398
	HVC (Alkmaar)	1.028.500
	Attero BV (Moerdijk)	958.301
	Twence BV Boeldershoek	894.689
	EEW Energy from Waste Delfzijl B.V.	828.792
	Attero Noord BV	623.757
	AVR Afvalverwerking BV (Duiven)	529.313
	ARN B.V.	362.286
	HVC Afvalcentrale Dordrecht	326.670
	Reststoffen Energie Centrale (REC)	318.000
	Slibverwerking Noord-Brabant	145.137
	DRSH Zuiveringsslib N.V.	137.846
	GMB Slibverwerking Zutphen BV	33.605
Behandeling van schadelijk afval	Afvalstoffen Terminal Moerdijk BV (ATM)	173.834
Beheer en exploitatie van transportnetten voor elektriciteit, aardgas en warm water	Enecogen VOF	1.903.268
	Eneco (Lage Weide)	582.110
	Eneco Bio Golden Raand	417.020
	Eneco Warmteproductie Utrecht B.V.	200.965
	Eneco Solar, Bio & Hydro BV, WKC Ypenburg	38.778
Elektrotechnische bouwinstallatie	Veolia Industriediensten BV	61.383
Gesorteerd materiaal voorbereiden tot recycling	BECC B.V.	224.139
	Recycling Combinatie Bouw- en Sloopafval Rotterdam	62.143
	Sonac Burgum BV	46.440
	Theo Pouw Secundaire Bouwstoffen B.V.	36.285
Groothandel in vloeibare en gasvormige brandstoffen	Alco Energy Rotterdam	345.654
Handel in elektriciteit en in gas via leidingen	Emmtec Services BV	149.988
	Ennatuurlijk BV (Helmond)	57.314
Inzameling van onschadelijk afval	SUEZ ReEnergy Roosendaal	366.007
Mouterijen	Holland Malt (Bavaria)	31.353
Opslag in tanks	Odfjell Terminals (Rotterdam) BV	38.431
Productie en distributie van stoom en gekoelde lucht	Enecal Energy VOF	202.963
	RWE Eemshaven Holding BV	7.197.546

Sbi_naam	Bedrijf	Max uitstoot tCO ₂ /jaar
Productie van elektriciteit door thermische, kern- en warmtekrachtcentrales	Uniper Centrale Maasvlakte	4.918.750
	Nuon Power Generation BV (Velsen)	4.027.363
	RWE Generation NL B.V.	3.584.757
	Centrale Rotterdam	2.476.254
	Nuon Power Projects 1 BV (Eemshaven)	2.248.106
	RWE Generation NL B.V.	2.154.190
	Sloe Centrale BV (Vlissingen)	1.798.500
	Maxima-centrale	1.789.174
	ENGIE Energie Nederland NV (Eemscentrale)	1.755.755
	Nuon Power IJmond 1	1.738.864
	Nuon Power Generation BV (Diemen)	1.320.705
	Air Liquide Pergen VOF	1.260.579
	Rijnmond Energie	1.094.728
	Nuon Power Generation BV (Hemweg)	860.704
	Maastroom Energie CV	832.572
	RWE Generation NL B.V.	540.861
	Uniper Centrale RoCa	326.393
	Eurogen CV	193.708
	E.On Generations Den Haag	164.962
	E.on Locatie Leiden	134.032
	BES Exploitatie BV	31.585
Productie van elektriciteit door zonnecellen, warmtepompen en waterkracht	Biomassacentrale Moerdijk	351.266
Teelt van aardappels en overige wortel- en knolgewassen	Leo Hoogweg BV	79.114
Teelt van groenten onder glas	Seasun BV	34.405
Universitair medische centra	AMC Academisch Medisch Centrum	36.906
Vervaardiging van aardappelproducten	Aviko BV	64.211
	Lamb Weston/Meijer Potatoes	58.430
	Agristo NV	43.895
	Farm Frites BV	36.235
Vervaardiging van aluminium	Klesch Aluminium Delfzijl	114.605
Vervaardiging van bier	Bavaria NV	42.843
	Heineken Nederland BV (Zoeterwoude)	41.804
	Heineken Nederland BV (Zoeterwoude)	32.530
Vervaardiging van glasvezels	Saint Gobain Construction Products	46.398
	Electric Glass Fiber NL BV	38.005
Vervaardiging van grafisch papier en karton	Parenco B.V.	239.210
	Sappi Maastricht BV	168.684
	Crown van Gelder N.V.	127.708
	Solidus Solutions (Bad Nieuweschans)	42.496
Vervaardiging van holglas	O-I Manufacturing Netherlands BV (Leerdam)	82.178
	O-I Manufacturing Netherlands BV (Maastricht)	74.861
	Ardagh Glass Dongen BV	72.888
	Ardagh Glass Moerdijk	52.096
Vervaardiging van ijzer en staal en van ferrolegeringen	Tata Steel IJmuiden BV	5.956.604
Vervaardiging van industriële gassen	Air Products Nederland BV (Pernis)	738.389

Sbi_naam	Bedrijf	Max uitstoot tCO ₂ /jaar
	Air Liquide Nederland BV	717.080
	Air Liquide Nederland BV	130.816
	Air Products Nederland BV (Botlek)	107.289
Vervaardiging van kleurstoffen en pigmenten	Tronox Pigments (Holland) BV	93.629
Vervaardiging van kunstmeststoffen en stikstofverbindingen	YARA Sluiskil BV	3.131.268
Vervaardiging van kunststof in primaire vorm	Chemelot Site Permit BV	3.402.538
	SABIC Innovative Plastics BV	266.953
	Indorama Ventures Europe BV	163.512
	Botlek VCM Plant	102.423
	SABIC Innovative Plastics BV	67.563
	Eastman Chemical Middelburg BV	59.156
	Hexion B.V.	42.835
	Chemours Netherlands BV	34.228
Vervaardiging van niet-metaalhoudende minerale producten (geen schuur-, slijp- en polijstmiddelen)	Rockwool B.V.	129.534
Vervaardiging van organische basischemicaliën (geen petrochemische producten)	Emerald Kalama Chemical Rotterdam BV	72.877
	Croda	36.364
Vervaardiging van overige anorganische basischemicaliën	Delesto BV	419.583
	Nobian Chemicals BV (Hengelo)	252.731
	Cabot BV	204.626
	Nobian Industrial Chemicals BV (Botlek)	127.001
	ESD-SIC BV	106.225
	PPG Industries Chemicals BV	52.870
	FMC Chemicals Netherlands BV	34.219
Vervaardiging van overige chemische producten n.e.g.	Cabot Norit Activated Carbon (Klazienaveen)	65.657
	Albemarle Catalysts Company B.V.	60.168
	Neste Oil Netherlands B.V.	59.531
Vervaardiging van overige elektrische apparatuur	Aluminium & Chemie Rotterdam BV	64.084
Vervaardiging van overige voedingsmiddelen n.e.g.	DSM Delft Permit BV	60.143
Vervaardiging van papier en karton voor verpakking	Stora Enso De Hoop B.V.	183.046
	Smurfit Kappa Roermond Papier BV	175.420
	Mayr-Melnhof Eerbeek BV	71.616
	ESKA Graphic Board BV (Hoogezand)	52.013
	ESKA Graphic Board BV (Sappemeer)	36.021
Vervaardiging van petrochemische producten	Dow Benelux BV (Hoek)	4.053.787
	Shell Nederland Chemie BV (Moerdijk)	2.651.661
	Lyondell Chemie Nederland BV	325.559
	Bio Methanol Chemie Nederland (BioMCN)	302.247
	Dow Benelux BV (Hoek)	145.785
	ExxonMobil Chemical Holland BV (ROP van RPI)	57.969
	Shell Nederland Chemie BV (Pernis)	48.699
	ExxonMobil Chemical Holland BV (RPP van RPI)	31.809
Vervaardiging van plantaardige en dierlijke oliën en vetten (geen margarine en andere spijsvetten)	Archer Daniels Midland Europoort BV (ADM)	148.080
	Bunge Netherlands BV (Soja)	64.177
	Sime Darby Unimills B.V.	48.075
	Sonac Vuren BV	37.154

Sbi_naam	Bedrijf	Max uitstoot tCO ₂ /jaar
Vervaardiging van suiker	Suiker Unie Vierverlaten	151.354
	Suiker Unie (Dinteloord)	129.854
Vervaardiging van veevoeders	Rendac Son BV	78.239
Vervaardiging van zetmeel en zetmeelproducten	Cargill Benelux BV	221.297
	Avebe u.a. (Gasselternijveen)	101.626
	Avebe u.a. (Ter Apeldijk)	98.668
	Tate & Lyle Netherlands BV	93.493
	Cargill BV	59.460
Vervaardiging van zuivelproducten (geen consumptie-ijs)	FrieslandCampina Veghel (DMV International)	89.173
	FrieslandCampina (Leeuwarden)	73.080
	FrieslandCampina Domo (Borculo)	67.572
	Promelca B.V. (Gorinchem)	53.727
	FrieslandCampina Domo (Beilen)	48.723
	DOC Kaas (Zuivelpark)	47.323
	FrieslandCampina Bedum	35.093
	FrieslandCampina Butter (Lochem)	32.870
Winning van overige delfstoffen n.e.g.	Nedmag BV	79.467

A Verdere uitwerking uitsluitingsgronden

A.1 Onvermijdbare procesemissies

Bij onvermijdbare procesemissies is er geen alternatief beschikbaar voor CCS, daarom worden sectoren, die enkel onvermijdbare procesemissies hebben, uitgesloten van de zeef. De sector ‘groothandel in vloeibare en gasvormige brandstoffen’ wordt uitgesloten van de zeef, omdat alle bedrijven in die sector enkel onvermijdbare procesemissies hebben. Alco Energy is het enige bedrijf in deze sector en wordt dus uitgesloten. Hiernaast is er nog de sector: ‘opslag in tanks’ waaronder een bedrijf valt: ‘Odfjell Terminals’. Ook deze sector heeft onvermijdbare procesemissies door de op- en overslag van brandstoffen.

Hierom wordt ook de ‘variant 4: Nieuwe pre-combustion CO₂-afvanginstallaties bij waterstofproductie uit industriële restgassen (ATR)’ uitgesloten. Bij sommige industriële processen ontstaan restgassen die met deze techniek minder CO₂ kunnen uitstoten. Hiervoor zijn geen effectieve alternatieven

A.2 Biogene uitstoot

Het gebruik van biomassa wordt al beschouwd als een duurzame techniek, er hoeft dus geen overstap gemaakt te worden naar een alternatieve duurzame techniek.

De volgende sector wordt uitgesloten van de zeef:

- ‘productie van elektriciteit door zonnecellen, warmtepompen en waterkracht’.
- In deze sectoren zijn uitsluitend bedrijven actief die alleen biogene CO₂ uitstoten.

A.3 Elektriciteitsopwekking

Voor elektriciteitsopwekking zijn er momenteel geen concrete projecten voor CCS bekend. Op termijn overwegen kolencentrales om over te stappen op biomassa met CCS (RWE, 2023). Daarnaast is de evaluatie van kosteneffectiviteit voor CCS bij elektriciteitsproductie niet haalbaar binnen de huidige opzet van de zeefstudie, omdat het hiervoor noodzakelijk is de elektriciteitsmarkt te modelleren.

De volgende sectoren worden uitgesloten van de zeef:

- ‘Beheer en exploitatie van transportnetten voor elektriciteit, aardgas en warm water’;
- ‘Handel in elektriciteit en in gas via leidingen’;
- ‘Productie en distributie van stoom en gekoelde lucht’;
- ‘Productie van elektriciteit door thermische, kern- en warmtekrachtcentrales’.

In deze sectoren zijn uitsluitend bedrijven actief die elektriciteit produceren. In de sector ‘Vervaardiging van overige anorganische basischemicaliën’ is Delesto actief als elektriciteitsproducent, maar de overige bedrijven in de sector produceren geen elektriciteit, dus deze sector wordt niet uitgesloten van de zeef.

A.4 Staalproductie

De sector ‘Vervaardiging van ijzer en staal en van ferrolegeringen’ wordt uitgesloten van de zeef.

Het enige bedrijf dat actief is in deze sector is Tata Steel IJmuiden. Tata Steel heeft aangegeven in te willen zetten op de productie van staal met behulp van waterstof en elektrische vlamboogovens. In de overgang van kolen naar waterstof kiest Tata Steel IJmuiden voor het gebruik van aardgas. De vrijkomende CO₂ kan met CCS worden opgeslagen. Er lopen al veel studies naar Tata Steel en deze studie is niet gedetailleerd genoeg om daar een goede bijdrage aan te leveren.

De elektriciteitscentrales van Vattenfall op hoogovengas zijn ook gerelateerd aan de staal-sector, maar deze zijn al uitgesloten omdat zij onder elektriciteitsopwekking vallen.

A.5 Afvalverbranding en overige verwerking afval

CCS bij afvalverbranding is momenteel een goede stap om emissies te reduceren. AVI's kunnen dus buiten de zeef blijven. Het voorkomen van verbranding van afval is nog beter dan CCS op AVI's, maar dit valt onder het afval- en grondstoffenbeleid, wat buiten de scope van de zeef valt.

De volgende sectoren worden uitgesloten van de zeef:

- ‘behandeling van onschadelijk afval’;
- ‘behandeling van schadelijk afval’;
- ‘inzameling van onschadelijk afval’
- ‘gesorteerd materiaal voorbereiden tot recycling’.

In deze sectoren zijn uitsluitend bedrijven actief die het verbranden of verwerken van afval als hoofdactiviteit hebben.

A.6 Glastuinbouw

Met de verlaging van de grens voor relevante installaties voor het gebruik van CCS, komen voor het eerst ook enkele glastuinbouwbedrijven in beeld. Glastuinbouw is al een praktijkvoorbeeld van CCU, waarbij via de OCAP-leiding CO₂ uit de Rotterdamse haven naar glastuinbouw wordt geleid.

De uitstoot van CO₂ door de glastuinbouw komt door de inzet van wkks, die warmte, stroom en CO₂ produceren door aardgas te verbranden. Het produceren van CO₂ is hierbij specifiek het doel, omdat dit de planten sneller laat groeien. De glastuinbouw zal dan ook niet gaan inzetten op CCS en wij sluiten hierom deze sector uit van onze verdere analyse.

Hierdoor worden de sectoren ‘Teelt van aardappels en overige wortel- en knolgewassen’ en ‘Teelt van groenten onder glas’ uitgesloten van verdere analyse.

A.7 Overige uitgesloten sectoren

Aluminium

De sector ‘Vervaardiging van aluminium’ wordt uitgesloten omdat het enige bedrijf in de sector (Klesch Aluminium Delfzijl/’Aldel’) failliet is gegaan (Schyns, 2022).

Mouterijen

‘Mouterijen’ worden uitgesloten doordat hier slechts één bedrijf binnen actief is: Holland Malt. Dit bedrijf is bezig met het onderzoeken van geothermie. Hierom sluiten wij dit hier uit.

Vervaardiging van overige elektrische apparatuur

Aluchemie staat onder de SBI ‘Vervaardiging van overige elektrische apparatuur’. Dit is foutief, het produceerde koolstofanodes voor aluminium. Echter is dit bedrijf failliet en kan dus als hele sector worden uitgesloten.

B Uitwerking technieken

B.1 CCS-technieken

Voor de CCS-technieken in de zeefstudie zijn de sheets gebruikt uit het OT-model 2025 dat onder embargo aan CE Delft is verstrekt vanuit het PBL. Deze staan weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10 - Koppeling CCS-technieken in de zeefstudie en categorieën in OT-model van 2025

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), vloeibaar transport (variant 5B)
Gasgestookt procesfornuis met CCS	
Bestaande SMR, pre-combustion-afvang	CCS - Nieuwe pre-combustion-CO ₂ -afvang, bestaande installatie, gasvormig transport (variant 3A), vloeibaar transport (variant 3B)
Bestaande SMR, post-combustion-afvang	CCS - Nieuwe post-combustion-CO ₂ -afvang, bestaande industriële installatie, gasvormig transport (variant 5A), vloeibaar transport (variant 5B)
Nieuwe SMR, post-combustion-afvang	CCS - Nieuwe post-combustion-CO ₂ -afvang, nieuwe installatie, gasvormig transport (variant 8A), vloeibaar transport (variant 8B)
Nieuwe ATR, pre-combustion-afvang	CCS - Nieuwe pre-combustion-CO ₂ -afvang, nieuwe installatie, gasvormig transport (variant 7A), vloeibaar transport (variant 7B)
Bestaande ATR, pre-combustion-afvang	CCS - Nieuwe pre-combustion-CO ₂ -afvang, bestaande installatie, gasvormig transport (variant 3A), vloeibaar transport (variant 3B)

De variabele kosten voor de CCS-technieken zijn opgebouwd uit de verwerkingskosten voor transport en opslag van CO₂, de energiekosten en overige O&M kosten (e.g. kosten voor onderhoud van de afvanginstallatie, onderhoud van pijpleidingen, compressorstations, gebruikte chemicaliën bij het afvangen van CO₂, etc.). De vorige zeefstudies die zijn uitgevoerd hebben het OT-model dat destijds werd uitgegeven als basis gebruikt om de overige O&M kosten te bepalen. De totale variabele O&M-kosten zijn hierbij verminderd met de verwerkingskosten voor CO₂ en de energiekosten. Tabel 11 en Tabel 12 tonen de waardes die corresponderen met de variabele O&M-kosten (Midden-scenario) voor CCS-technieken in 2024 voor gasvormig transport en vloeibaar transport, respectievelijk.

Tabel 11 - Variabele O&M-kosten voor het Midden-scenario van de CCS-technieken 2024, gasvormig transport

	Variabele O&M totaal (€/ton CO ₂)	Verwerkings- toeslag (€/ton CO ₂)	Energie- kosten (€/ton CO ₂)	Overige O&M kosten (€/ton CO ₂)
Bestaande SMR, post (5A)	€ 124,60	€ 71,80	€ 28,84	€ 23,96
Nieuwe SMR, post (8A)	€ 122,90	€ 71,80	€ 27,11	€ 23,99
Bestaande SMR, pre (3A)	€ 115,70	€ 71,80	€ 20,00	€ 23,90
Nieuwe ATR, pre (7A)	€ 110,40	€ 71,80	€ 19,33	€ 19,27
Bestaande ATR, pre (3A)	€ 115,70	€ 71,80	€ 20,00	€ 23,90

Tabel 12 - Variabele O&M-kosten voor het Midden-scenario van de CCS-technieken 2024, vloeibaar transport

	Variabele O&M totaal (€/ton CO ₂)	Verwerkings- toeslag (€/ton CO ₂)	Energie- kosten (€/ton CO ₂)	Overige O&M kosten (€/ton CO ₂)
Bestaande SMR, post (5B)	€ 149,40	€ 86,60	€ 31,43	€ 31,37
Nieuwe SMR, post (8B)	€ 147,70	€ 86,60	€ 29,70	€ 31,40
Bestaande SMR, pre (3B)	€ 140,50	€ 86,60	€ 22,58	€ 31,32
Nieuwe ATR, pre (7B)	€ 135,20	€ 86,60	€ 21,91	€ 26,69
Bestaande ATR, pre (3B)	€ 140,50	€ 86,60	€ 22,58	€ 31,32

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 afvang in 2024 (PBL, 2024), uitgaande van 8.000 uur per jaar en gasvormig CO₂-transport. Voor vloeibaar transport is dat 86,60 €/ton afvang in 2024. Voor 2025 zien we geen indicatie dat daar veranderingen in komen.

B.2 HT-warmtepomp voor stoomproductie

Voor de hogetemperatuurwarmtepomp is het blad 'Industriële warmtepomp, gesloten systeem (8.000 uur)' van het OT-model 2025 als uitgangspunt genomen. We bespreken hierna 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 0% 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 het OT-model 2025 is aangenomen. Hierdoor is het inputvermogen berekend op basis van de COP-waarde van 3,5 zoals vermeld in het OT-model van 2025. De overige aangepaste parameters, investeringskosten, vaste O&M-kosten en relatief elektriciteitsgebruik, zijn overgenomen uit het OT-model, welke staan vermeld in Tabel 13.

Tabel 13 - Parameters OT-model voor het Midden-scenario van de hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Inputvermogen	400	kW _{th}	Berekend o.b.v. COP
Outputvermogen (thermisch of hernieuwbaar gas)	1.400	kW _{th}	OT-Model 2025
Investeringskosten output gebaseerd	1.096	€/kW _{output}	OT-Model 2025
Vaste O&M-kosten output gebaseerd	91,3	€/kW/jaar	OT-Model 2025
Relatief elektriciteitsgebruik	0,286	kWh/kWh	OT-Model 2025

B.3 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, 2024).

B.4 Waterstoftechnieken

B.4.1 Waterstofboiler

De kosten van de waterstofboiler zijn gebaseerd op de kosten voor een retrofit, zoals te vinden in de MIDDEN-database (TC0474 - Hydrogen boiler). We hebben verder aangenomen dat eventuele financiële parameters vergelijkbaar zijn met een grootschalige elektrische boiler voor de industrie, zoals opgenomen in het OT-model 2025. Zie Tabel 14.

Tabel 14 - 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	6%	%	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)
Rendement op eigen vermogen	15%	%	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)
Aandeel eigen vermogen in investering	30%	%	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)
Vennootschapsbelasting	25,8%	%	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Economische levensduur	15	jaar	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)
Termijn lening	15	jaar	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)
Afschrijvingstermijn	15	jaar	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)
Beleidsperiode	15	jaar	OT-model referentie grootschalige elektrische boiler (industrie)

B.4.2 Procesfornuis op waterstof

In de zeefstudie voor 2024 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 15.

Tabel 15 - 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	17	-	
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	8,2	€/kW/jaar	MIDDEN
Emissiefactor - Productie van warmte of overig	0,225	kg CO ₂ /kWh	
Rendement op vreemd vermogen	6%	%	Notitie uitgangspunten
Rendement op eigen vermogen	15%	%	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

B.4.3 Groene waterstof

In de SDE++ 2025 wordt er onderscheid gemaakt tussen vier afzonderlijke categorieën als het gaat om de productie van groene waterstof:

1. Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met windpark, 25% vermogens-verhouding.
2. Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met zonnepark, 10% vermogens-verhouding.

3. Waterstofproductie via elektrolyse, directe gemeenschappelijke lijn met wind- en zonnepark, 50% vermogensverhouding.
4. Waterstofproductie via elektrolyse, netgekoppeld met stroomafnameovereenkomst 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 gemeenschappelijke lijn met wind- en zonnepark, 50% vermogensverhouding*' als uitgangspunt genomen. Deze heeft met 779 €/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 2025 voor deze SDE-categorie. Wel noemenswaardig: Enkele parameters zijn weliswaar variabel gemaakt aan de hand van de onzekerheidsmarges beschreven in Tabel 5. 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.

B.5 Groengastechnieken

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;
- allesvergisting, Hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting < 100 kW, Hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting 110-275 kW, Hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting < 275-450 kW, Hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting Mesthub 450-1500 kW, Hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting > 1500 kW, Hernieuwbaar gas;
- RWZI Verbeterde slibgisting, Hernieuwbaar gas;
- RWZI Verbeterde slibgisting, Nieuw hernieuwbaar gas;
- allesvergisting levensduurverlenging, Hernieuwbaar gas;
- allesvergisting levensduurverlenging, Nieuw hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting levensduurverlenging 275-450 kW, Hernieuwbaar gas;
- monomestvergisting levensduurverlenging 275-450 kW, Nieuw hernieuwbaar gas.

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.

B.6 Procesfornuis op vaste biomassa

Voor het procesfornuis op vaste biomassa is ook 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.

B.7 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.

B.8 Iron Fuel Technology (RIFT)

Voor RIFT nemen we het blad '*RIFT Scenario 2 (alleen boiler)*' van het OT-model als uitgangspunt. Scenario 1 omvat de hele keten, echter hebben we toch enkel de boilerunit meegenomen om een eerlijke vergelijking met alternatieve boilers te kunnen maken. We hebben verder 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.