



Kosteneffectieve alternatieven voor CCS

Uitwerking van de 'zeef' ten bate
van de SDE++-subsidieronde voor
2023



CE Delft

Committed to the Environment

Kosteneffectieve alternatieven voor CCS

Uitwerking van de ‘zeef’ ten bate van de SDE++-subsidieronde voor 2023

Dit rapport is geschreven door:
Maarten de Vries, Chris Jongsma, Nina Voulis en Heleen Groenewegen

Delft, CE Delft, januari 2023

Publicatienummer: 23.220347.019

Industrie / Emissies / Kooldioxide / Opslag / Procestechologie / Economische factoren / Kosten / Rendement / Overheid / Beleid / Analyse

Opdrachtgever: Ministerie van EZK

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 meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Processen waar CCS potentieel een rol speelt	8
	2.1 Lijst van sectoren met grootschalige CO ₂ -uitstoot	8
	2.2 Voorselectie van sectoren	9
	2.3 Vertaling van sectoren naar processen	9
	2.4 Conclusie: lijst met processen waar CCS potentieel een rol speelt	10
3	Longlist en shortlist van alternatieven per proces	11
	3.1 Lijst met algemene verduurzamingsrichtingen	11
	3.2 Lijst met processpecifieke verduurzamingsopties	12
	3.3 Relevante combinaties van technieken	12
	3.4 Van longlist naar shortlist	13
4	Evaluatie kosteneffectiviteit	14
	4.1 Methode	14
	4.2 Resultaten per proces	15
	4.3 Terugvertaling naar SDE-categorieën	19
	4.4 Beschouwing op de resultaten	20
5	Inbedding in breder beleid	22
	5.1 Inleiding	22
	5.2 Selectie van kansrijke alternatieven	22
	5.3 Nadere analyse van overige (beleids)aspecten	23
	5.4 Kansrijke alternatieven voor de belangrijkste processen	27
6	Conclusies	30
	Referenties	32
A	Sectoren en bedrijven >100 kton/j CO ₂ -uitstoot	34
B	Uitgesloten sectoren in meer detail	36
	B.1 Onvermijdbare procesemissies	36
	B.2 Biogene uitstoot	36
	B.3 Elektriciteitsopwekking	37
	B.4 Staalproductie	37
	B.5 Afvalverbranding en overige verwerking van afval	37
	B.6 Overige uitgesloten sectoren	38



C	Longlist met alternatieven	39
	C.1 Productie van laagtemperatuurstoom (<200 °C)	39
	C.2 Productie van MT/HT-stoom	43
	C.3 Productie van MT/HT directe warmte	43
	C.4 Indampen van waterige oplossingen	45
	C.5 Compressie van gassen	45
	C.6 Productie van waterstof	46
D	Uitwerking technieken	50
	D.1 Hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie	50
	D.2 Waterstofboiler	51
	D.3 Boiler op vaste biomassa	52
	D.4 Toepassing van groen gas	52
	D.5 Restwarmtestoom	53
	D.6 Procesfornuis op waterstof	53
	D.7 Procesfornuis op vaste biomassa	53
	D.8 Mechanical vapour recompression (MVR)	53
	D.9 Productie van groene waterstof	54
	D.10 CCS-technieken	54

Samenvatting

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

In het najaar van 2022 heeft CE Delft in opdracht van het ministerie van EZK de zeefmethodiek herzien (CE Delft, 2022), en vervolgens ook toegepast met het oog op de SDE-subsidieronde van 2023. Het resultaat hiervan is weergegeven in dit rapport.

In lijn met onze herziene zeefmethodiek hebben we eerst vastgesteld in welke industriële sectoren CCS zou kunnen worden toegepast. Vervolgens hebben we de voornaamste processen waarbij CO₂ uitgestoten wordt in die sectoren geïdentificeerd. We zijn uitgekomen op de volgende zes processen:

1. Productie van Lagetemperatuurstoom (LT-stoom).
2. Productie van Middentemperatuur-/Hogetemperatuurstoom (MT- en HT-stoom).
3. Productie van MT/HT directe warmte.
4. Indampen van waterige oplossingen.
5. Compressie van gassen.
6. Productie van waterstof.

Voor deze processen hebben we vervolgens de duurzame alternatieven onderzocht. Alternatieven die minder dan 80% emissiereductie realiseren ten opzichte van CCS of waarvan de implementatietijd langer is dan zes jaar zijn afgevalen. De resulterende shortlist bevat elf duurzame alternatieve technologieën:

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

Van deze duurzame technologieën en zes referentietechnologieën met CCS hebben we de subsidie-intensiteit bepaald - in termen van € per vermeden ton CO₂ - op basis van het Onrendabele Top (OT)-model van PBL. Daarnaast hebben we per techniek een onzekerheidsbandbreedte vastgesteld, aan de hand van drie scenario's voor de relevante parameters.

Vervolgens hebben we per proces¹ gekeken naar de subsidie-intensiteit van de relevante CCS-variant en de voor dit proces beschikbare alternatieven. Alleen voor het indampen van waterige oplossingen hebben we een technologie gevonden waarvan de subsidie-intensiteit lager is dan van CCS (en de kosteneffectiviteit dus hoger): MVR. De subsidie-intensiteit hiervan is € 24 per ton CO₂ volgens het OT-model, tegen € 88 voor een gasboiler gecombineerd met CCS. Omdat de SDE met technologieën (SDE-categorieën) werkt en niet met processen, is het niet mogelijk om alleen voor dit specifieke proces geen subsidie voor CCS toe te staan. Er kan dus op basis van onze studie geen SDE-categorie voor CCS van subsidie worden uitgesloten. Tegelijkertijd zijn er ook geen aanwijzingen dat de betreffende bedrijven CCS zouden willen toepassen in plaats van MVR.

Als laatste stap hebben we voor een viertal technieken een nadere analyse uitgevoerd van enkele (beleids)aspecten anders dan kosteneffectiviteit, zoals de onzekerheidsmarge in subsidie-intensiteit, milieueffecten en de beschikbaarheid van infrastructuur. We hebben deze analyse uitgevoerd voor CCS, MVR en twee technieken die zich qua kosteneffectiviteit nog niet met CCS kunnen meten maar wel relatief kansrijk zijn als alternatief: de HT-warmtepomp en de boiler op vaste biomassa.

Vervolgens hebben we per proces gekeken naar welke kansrijke alternatieven er in het verschiep liggen en hoe deze eventueel verder kunnen worden gestimuleerd. Voor de productie van (LT-)stoom biedt de **HT-warmtepomp** mogelijkheden. De kosten van deze technologie zijn nog relatief onzeker, deze zouden door nader onderzoek specifiek bepaald kunnen worden. Uit de nadere analyse bleek daarnaast dat netcongestie mogelijk een belemmering is voor deze optie. Ook de kosten van een **boiler op houtsnippers** (in plaats van pellets) zouden beter in beeld gebracht kunnen worden. Op termijn komt ook de **e-boiler** als kosteneffectief alternatief in beeld voor de productie van stoom, maar dit hangt vooral af van de mate waarin de elektriciteit op het net hernieuwbaar wordt opgewekt. Gebruik van **reststoom** is altijd een kosteneffectieve optie als deze beschikbaar is. Omdat reststoom niet op elke locatie beschikbaar is kan dit niet als algemeen toepasbare technologie worden gezien en kan subsidie voor CCS hierom niet worden uitgesloten.

Voor het indampen van waterige oplossingen is **MVR** al kosteneffectiever dan CCS. Voor de overige processen (productie van directe warmte en productie van waterstof) is op korte termijn nog geen kosteneffectief alternatief in zicht.

¹ Hierbij hebben we de productie van LT-stoom en de productie van MT/HT-stoom samengenomen. Ook de compressie van gassen valt hieronder, omdat op de shortlist alleen technieken voor compressie staan die werken met stoom. Netto kijken we dus naar vier typen processen in plaats van zes.

1 Inleiding

Aanleiding

Sinds 2020 staat de subsidieregeling Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++) open voor aanvragen op het gebied van Carbon Capture and Storage (CCS). In het Nederlandse Klimaatakkoord is afgesproken dat subsidiëring van CCS niet ten koste mag gaan van de ontwikkeling van alternatieve, schone energietechnieken. Bij CCS blijft immers de fossiele keten in stand en blijft een deel van de emissies bestaan.² Daarom is subsidiëring van CCS-projecten gereguleerd, onder andere via de zogenoemde zeefmethodiek. Daarbij wordt gekeken of er geen aantoonbare kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS. Als er een kosteneffectief alternatief wordt geïdentificeerd, wordt de betreffende CCS-categorie uitgesloten van subsidie. Het staat bedrijven dan nog steeds vrij om CCS toe te passen, alleen is hier dan geen SDE++-subsidie voor beschikbaar. CCS-technieken die, om wat voor reden dan ook, niet in de zeefmethodiek zijn opgenomen, kunnen niet worden uitgesloten van SDE++-subsidie op grond van de zeef.

De afgelopen jaren is de zeef toegepast op basis van de methode van Navigant, (2019), zonder dat er een kosteneffectief alternatief voor CCS werd geïdentificeerd. Het ministerie van EZK heeft CE Delft in het najaar van 2022 verzocht om die bestaande zeefmethodiek te herzien. Dat heeft geleid tot het rapport *Herziening zeefmethodiek CCS voor SDE++* (CE Delft, 2022), waarin we onze herziene methode uiteenzetten. In Figuur 1 is deze methode schematisch weergegeven.

Het Ministerie heeft CE Delft vervolgens de opdracht gegund om de herziene methode uit te werken met het oog op de SDE-subsidieronde van 2023. De hoofdvraag van deze opdracht was om vast te stellen of er, op basis van de herziene methode, op dit moment aantoonbare kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS. Het onderhavige rapport is de uitwerking van deze opdracht.

Leeswijzer

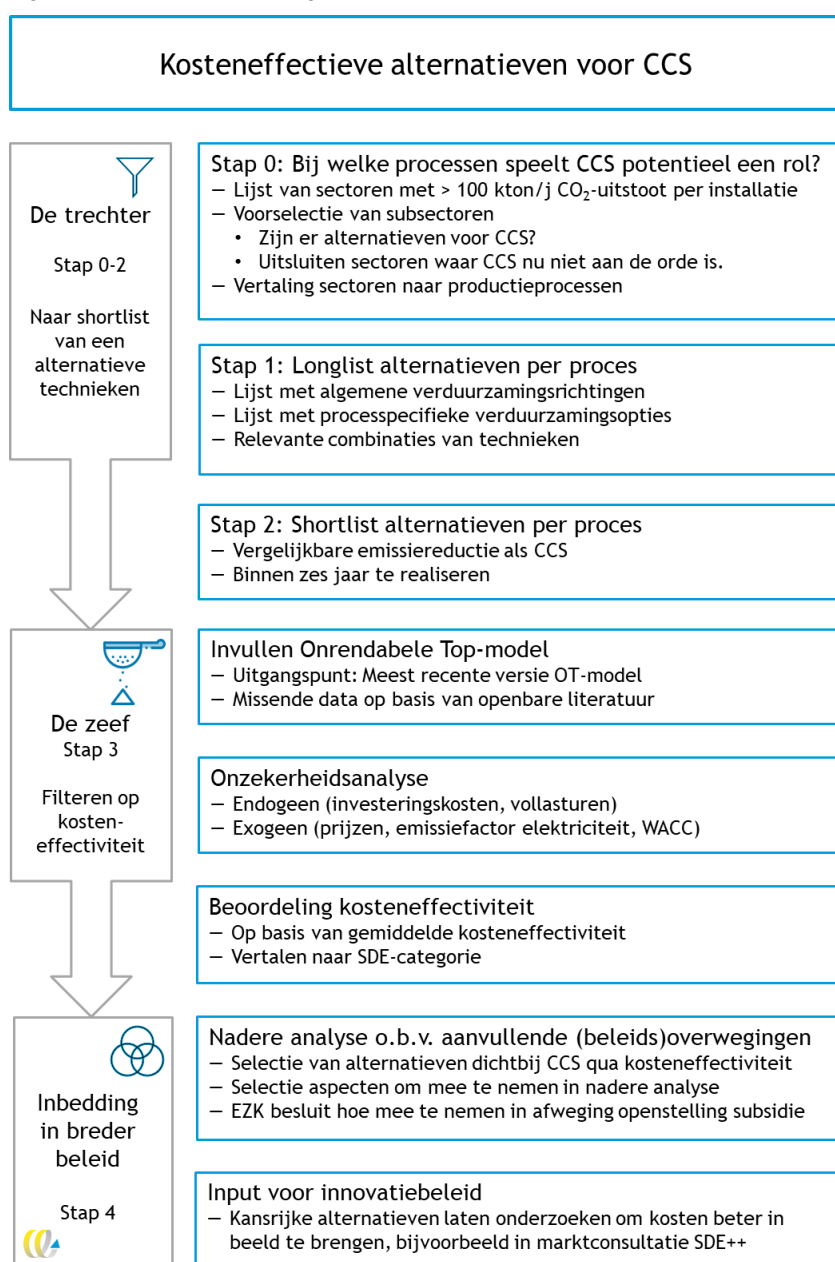
In het vervolg van dit rapport volgen we de stappen van de methodiek zoals aangegeven in Figuur 1. In **Hoofdstuk 2** worden de industriële processen bepaald waarbij CCS potentieel een rol speelt (Stap 0 uit de herziene methodiek). In **Hoofdstuk 3** worden de alternatieve duurzame technologieën vastgesteld voor deze processen. Eerst wordt een longlist van alternatieven opgesteld (Stap 1) en vervolgens wordt deze via een voorselectie teruggebracht tot een shortlist van alternatieven die daadwerkelijk op kosteneffectiviteit moeten worden geëvalueerd (Stap 2). In **Hoofdstuk 4** wordt deze evaluatie uitgevoerd - de eigenlijke zeef. Met behulp van het Onrendabele Top-model (OT-model) van PBL wordt de subsidie-intensiteit (en daarmee de kosteneffectiviteit) van CCS en van de duurzame alternatieven van de shortlist bepaald (Stap 3). De uitwerking van de laatste stap van onze methodiek (Stap 4) wordt uitgewerkt in **Hoofdstuk 5**. We voeren hier voor enkele kansrijke duurzame alternatieven een nadere analyse uit van (beleids)aspecten anders dan kosteneffectiviteit, die een rol zouden kunnen spelen in de overwegingen van EZK om bepaalde SDE-categorieën eventueel uit te sluiten van subsidie. Ook kijken we kort vooruit naar welke technologieën waarschijnlijk het meest aantrekkelijk worden als duurzaam

² Onder andere omdat bij CCS maximaal ca. 90% van de CO₂-emissies kan worden afgevangen en door *upstream*-emissies in de keten, waaronder die van het transport van fossiele brandstoffen en methaanlekages.

alternatief voor de belangrijkste processen, en hoe de informatie uit deze zeefstudie kan helpen om die technologieën verder te stimuleren. In **Hoofdstuk 6** volgen tot slot beknopte conclusies.

Met het oog op de leesbaarheid hebben we ervoor gekozen om de uitvoering en de resultaten van de verschillende stappen in de bovengenoemde hoofdstukken op hoofdlijnen weer te geven in enkele pagina's. Voor de achterliggende analyse verwijzen we steeds naar de bijlagen, die een uitgebreide en systematische uitwerking van de stappen bevatten. Ook adviseren we om het methoderapport (CE Delft, 2022) bij de hand te houden voor meer achtergrond bij het hoe en waarom van de verschillende (deel)stappen. We verwijzen in het vervolg naar dit rapport simpelweg als 'de methode'.

Figuur 1 - Schematische weergave van de herziene zeefmethodiek



2 Processen waar CCS potentieel een rol speelt

2.1 Lijst van sectoren met grootschalige CO₂-uitstoot

2.1.1 Bestaande installaties

Conform de methode beschouwen we alleen stationaire installaties met een CO₂-uitstoot van meer dan 100 kton/j. Deze lijst met bedrijven is opgesteld aan de hand van de 'data export module' van de emissieregistratie.

In Bijlage A staan de installaties weergegeven die meer dan 100 kton per jaar CO₂ uitstoten. De bedrijven zijn gegroepeerd per sector en staan gesorteerd op volgorde van afnemende CO₂-emissies. De weergegeven uitstoot is de hoogste waarde van de jaarlijkse uitstootcijfers in 2019, 2020 en 2021.

In totaal betreft het 77 bedrijven, verdeeld over 25 sectoren. De gezamenlijke uitstoot van deze bedrijven bedraagt 84 Mton CO₂ per jaar.

Het valt op dat de sectorindeling in de data van de emissieregistratie niet altijd een goede afspiegeling is van de daadwerkelijke activiteiten van het bedrijf. Zie bijvoorbeeld de gascentrale van Rijnmond Energie die valt onder 'Productie van elektriciteit door wind-energie' of de industriële wkk van Emmtec Services die valt onder 'Overige gespecialiseerde reiniging'. In de volgende stappen kijken we daarom naar de activiteiten van de individuele bedrijven in een sector, maar rapporteren we de resultaten wel op sectorniveau.

2.1.2 Nieuwe installaties

Naast de bestaande installaties nemen we ook een aantal nieuwe processen mee. 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 sectoren 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 bestaan uit een nieuwe boiler. Dit zorgt ervoor dat de meerkosten voor CCS beperkt zijn, omdat een groot deel van de huidige installaties behouden kan blijven. Bij geheel nieuwe industriële installaties zal het kostenverschil tussen CCS en de duurzame alternatieven veel kleiner zijn omdat er 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.

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: Uitsluiten van een sector zorgt ervoor dat een eventuele subsidieaanvraag *altijd mee mag doen in de SDE* en dus niet wordt tegengehouden vanuit de zeef.

In totaal sluiten we 17 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.

Tabel 1 - Uitgesloten sectoren

criterium	Uitgesloten sectoren
Onvermijdbare procesemissies	<ul style="list-style-type: none"> - Groothandel in vloeibare en gasvormige brandstoffen - Productie van waterstof uit restgas
Biogene uitstoot	<ul style="list-style-type: none"> - Gesorteerd materiaal voorbereiden tot recycling - Productie van elektriciteit door zonnecellen, warmtepompen en waterkracht
Elektriciteitsopwekking	<ul style="list-style-type: none"> - Beheer en exploitatie van transportnetten voor elektriciteit, aardgas en warm water - Overige gespecialiseerde reiniging - Productie en distributie van stoom en gekoelde lucht - Productie van elektriciteit door thermische, kern- en warmtekracht-centrales - Productie van elektriciteit door windenergie
Staalproductie	<ul style="list-style-type: none"> - Vervaardiging van ijzer en staal en van ferrolegeringen
Afvalverbranding en overige verwerking van afval	<ul style="list-style-type: none"> - Behandeling van onschadelijk afval - Behandeling van schadelijk afval - Inzameling van onschadelijk afval
Overige uitsluitingen	<ul style="list-style-type: none"> - Vervaardiging van aluminium

2.3 Vertaling van sectoren naar processen

De geselecteerde sectoren worden vertaald naar processen door te kijken wat de voornaamste processen zijn die CO₂ uitstoten binnen een sector. 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. 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.

In Tabel 2 staan de resulterende processen per sector weergegeven.

Tabel 2 - Belangrijkste processen per sector

Sector	Proces
Aardolieraffinage	– Productie van MT/HT-stoom ³ – Productie van MT/HT directe warmte
Vervaardiging van grafisch papier en karton Vervaardiging van papier en karton voor verpakking	– Productie van LT-stoom
Vervaardiging van industriële gassen	– Productie van waterstof uit aardgas
Vervaardiging van kunstmeststoffen en stikstofverbindingen	– Productie van waterstof uit aardgas
Vervaardiging van kunststof in primaire vorm Vervaardiging van petrochemische producten	– Productie van MT/HT directe warmte – Productie van MT/HT-stoom – Compressie van gassen
Vervaardiging van niet-metaalhoudende minerale producten (geen schuur-, slijp- en polijstmiddelen)	– Productie van MT/HT directe warmte
Vervaardiging van overige anorganische basischemicaliën	– Indampen van waterige oplossingen – Productie van MT/HT directe warmte
Vervaardiging van plantaardige en dierlijke oliën en vetten (geen margarine en andere spijsvetten)	– Productie van LT-stoom – Productie van MT/HT-stoom
Vervaardiging van suiker	– Indampen van waterige oplossingen
Vervaardiging van zetmeel en zetmeelproducten	– Productie van LT-stoom

De SDE-categorieën voor nieuwe installaties beschrijven geen sector, maar een proces (namelijk de productie van waterstof) en hoeven dus niet vertaald te worden naar een proces.

2.4 Conclusie: lijst met processen waar CCS potentieel een rol speelt

Als de lijst met processen in Tabel 2 wordt ontdaan van dubbele vermeldingen, dan blijven de volgende zes processen over:

1. Productie van LT-stoom.
2. Productie van MT/HT-stoom.
3. Productie van MT/HT directe warmte.
4. Indampen van waterige oplossingen.
5. Compressie van gassen.
6. Productie van waterstof.

³ LT - Lage temperatuur (<200 °C); MT - Midden temperatuur (200-500 °C); HT - Hoge temperatuur (>500 °C).



3 Longlist en shortlist van alternatieven per proces

In Bijlage C zijn alle alternatieve technologieën opgenomen die we hebben beschouwd, met een korte uitleg en een onderbouwing van waarom zij wel/niet op de shortlist zijn gekomen.

3.1 Lijst met algemene verduurzamingsrichtingen

We hanteren de volgende lijst met algemene verduurzamingsrichtingen:

- CCS (de referentietechnologie);
- energie-efficiëntie;
- elektrificatie;
- waterstof;
- biomassa;
- overige hernieuwbare warmte.

Deze lijst is gebaseerd op de aanpak van voorgaande zeefstudies (Navigant, 2019), met de volgende wijzigingen:

- De categorie ‘Duurzame energie’ wordt opgesplitst:
 - Opwek van hernieuwbare elektriciteit met zon-pv, windenergie en biomassa is buiten scope. De zeef kijkt naar Scope 1-emissies (‘schoorsteenuitstoot’). De indirecte uitstoot van elektriciteitsproductie valt onder het emissiereductiedoel van de elektriciteitssector en niet van de industrie.
 - We introduceren een nieuwe categorie ‘Overige hernieuwbare warmte’ voor geothermie, zonthermie en restwarmte.
- Resource efficiency laten we buiten beschouwing. Het terugdringen van materiaalgebruik is altijd een goed idee, maar heeft geen invloed op de inrichting van het productieproces van het basismateriaal.
- Carbon Capture and Use (CCU) laten we buiten beschouwing omdat het geen duurzaam alternatief vormt voor CCS, zie kader.

CCU als alternatief voor CCS?

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 grootschalige 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:
 - a 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.
 - b 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, 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: een factor 10-100 kleiner dus (CO₂ Value Europe, lopend). Zelfs als CCU grootschalig wordt toegepast, dan zal alsnog de meeste CO₂ moeten worden opgeslagen omdat de CCU-ketens de toestroom niet kunnen verwerken.

3.2 Lijst met processpecifieke verduurzamingsopties

We gaan de algemene verduurzamingsrichtingen uit de vorige paragraaf nu specifiek maken voor de zes te behandelen processen. Per proces is de fossiele referentie-installatie bepaald en, aan de hand van de methode, de toegepaste variant van CCS. Dit is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 - Fossiele referentietechniek en toegepaste variant van CCS per proces

Proces	Fossiele installatie	Toegepaste variant van CCS (categorie in SDE++)
Productie van LT-stoom	Gasgestookte boiler	Post-combustion, gasvormig transport (5A)
Productie van MT/HT-stoom		
Productie van MT/HT directe warmte	Gasgestookt procesfornuis	
Indampen van waterige oplossingen	Gasgestookte boiler	
Compressie van gassen	Aardgasboiler met backpressure stoomturbine	
Productie van waterstof	Bestaande SMR	Pre-combustion, gasvormig transport (7A)
		Post-combustion, gasvormig transport (5A)
	Nieuwe SMR	Post-combustion, gasvormig transport (8A)
	Nieuwe ATR	Pre-combustion, gasvormig transport (7A)

Voor de sectoren die in scope zijn, hebben we in de MIDDEN-rapporten van TNO en PBL gezocht naar alternatieven voor de processen die we meenemen in de zeef. Daarnaast hebben we enkele additionele processpecifieke opties toegevoegd op basis van openbare literatuur en eigen kennis.

3.3 Relevante combinaties van technieken

In de methode staat dat combinaties worden overwogen tussen de volgende technieken:

1. Een techniek die alle energie voor het proces kan leveren. **En**
2. Een techniek die zorgt voor een lager energiegebruik, minder emissies of lagere kosten, te weten:
 - a energiebesparing;
 - b procesinnovatie;
 - c een warmtepomp.

Praktisch gezien is een combinatie nuttig als een kleinere maatregel zeer kosteneffectief is, maar op zichzelf onvoldoende emissies reduceert om de eis van 80% emissiereductie te halen. De kleinere maatregel kan dan gecombineerd worden met een andere maatregel, zodanig dat de twee technieken samen wél voldoende emissiereductie realiseren én een betere kosteneffectiviteit hebben dan CCS.

We zijn geen dergelijke combinaties tegengekomen.

3.4 Van longlist naar shortlist

De longlist met alle alternatieve technologieën is opgenomen in Bijlage C. Per alternatief staat uitgewerkt hoe de technologie werkt en of het aan de eisen voldoet voor CO₂-reductie (minimaal 80%) en realisatietijd (maximaal zes jaar - dezelfde realisatietijd als gehanteerd wordt voor de CCS-technieken in de SDE). De technieken die aan de eisen voldoen, vormen samen de shortlist, nadat alle dubbele vermeldingen zijn verwijderd.

De shortlist bestaat uit de volgende technieken:

Duurzame alternatieven:

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

Fossiele referentietechnieken

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

4 Evaluatie kosteneffectiviteit

4.1 Methode

4.1.1 Algemene aanpak

De kosteneffectiviteit wordt geëvalueerd door middel van het Onrendabele Top-model (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 2023 onder embargo van PBL ontvangen.

De rekenmethodiek van het OT-model laten we onaangepast, we passen enkel de invoergegevens aan. Waar mogelijk gebruiken we zoveel mogelijk de gegevens die al in het OT-model zijn ingevuld, aangevuld met cijfers uit de literatuur waar nodig. Zie Bijlage D voor de toegepaste parameters per techniek.

We rekenen ook twee onzekerheidsscenario's door om de invloed van hogere/lagere kosten/prijzen/emissiefactoren te kunnen bepalen. Zie de volgende paragraaf voor meer informatie over de onzekerheidsscenario's.

Na invoer van alle gegevens en de doorwerking van de onzekerheidsscenario's ontstaat er een bandbreedte van de subsidie-intensiteit van een techniek. Deze bandbreedte wordt gebruikt voor de nadere analyse (zie Hoofdstuk 5).

4.1.2 Gevoeligheidsanalyse

We hebben een gevoeligheidsanalyse gedaan door de parameters te variëren die het belangrijkste zijn voor de kosteneffectiviteit (subsidie-intensiteit). De bandbreedte is gebaseerd op externe bronnen. De bandbreedte in de prijzen is bijvoorbeeld gebaseerd op de KEV 2022 (PBL, 2022b). Zie het methoderapport voor de exacte herkomst van de bandbreedte per parameter. In Tabel 4 is weergegeven in welke waardes per parameter deze aanpak resulteert.

Tabel 4 - Gehanteerde waarden in 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}	€ 0,028	€ 0,050	€ 0,061
	Elektriciteitsprijs	€/kWh	€ 0,062	€ 0,091	€ 0,116
	Waterstofprijs	€/kWh _{LHV}	€ 0,046	€ 0,075	€ 0,089
	Prijs houtpellets	€/ton	€ 161	€ 218	€ 323
	CO ₂ -prijs	€/ton CO ₂	€ 94	€ 119	€ 161
	Emissiefactor elektriciteit	kg CO ₂ /kWh	0,08	0,12	0,24
	WACC			-25%	Nominale waarde

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

4.2 Resultaten per proces

4.2.1 Productie van LT/MT/HT-stoom

Er is geen duurzaam alternatief dat een lagere subsidie-intensiteit heeft dan de aardgas-gestookte stoomboiler met post-combustion CCS, zie Figuur 2. Deze CCS-techniek heeft een subsidie-intensiteit van 65/88/121 €/ton in het Laag/Midden/Hoog-scenario.

De **hogetemperatuurwarmtepomp** gebruikt restwarmte uit het productieproces om lagetemperatuurstoom te produceren. De HT-warmtepomp heeft een subsidie-intensiteit van 125/161/416 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario. De middenwaarde is bijna twee keer zo hoog als die van CCS, al overlapt de bandbreedte wel bijna. De bandbreedte voor de warmtepomp is bijzonder groot omdat in de onzekerheidsscenario's zowel de kosten van elektriciteit en aardgas variëren als de emissie-intensiteit van de elektriciteit. De onzekerheid zit dus zowel in de kostprijs van de techniek als in de emissiereductie. De middenwaarde kan omlaag door ontwikkeling van de techniek en verdere verduurzaming van de elektriciteitsmix. De bandbreedte kan met name gereduceerd worden als de bandbreedte in de raming van de restemissies van de elektriciteitssector omlaag gaat, bijvoorbeeld door beleid voor een volledig CO₂-vrije elektriciteitsvoorziening.

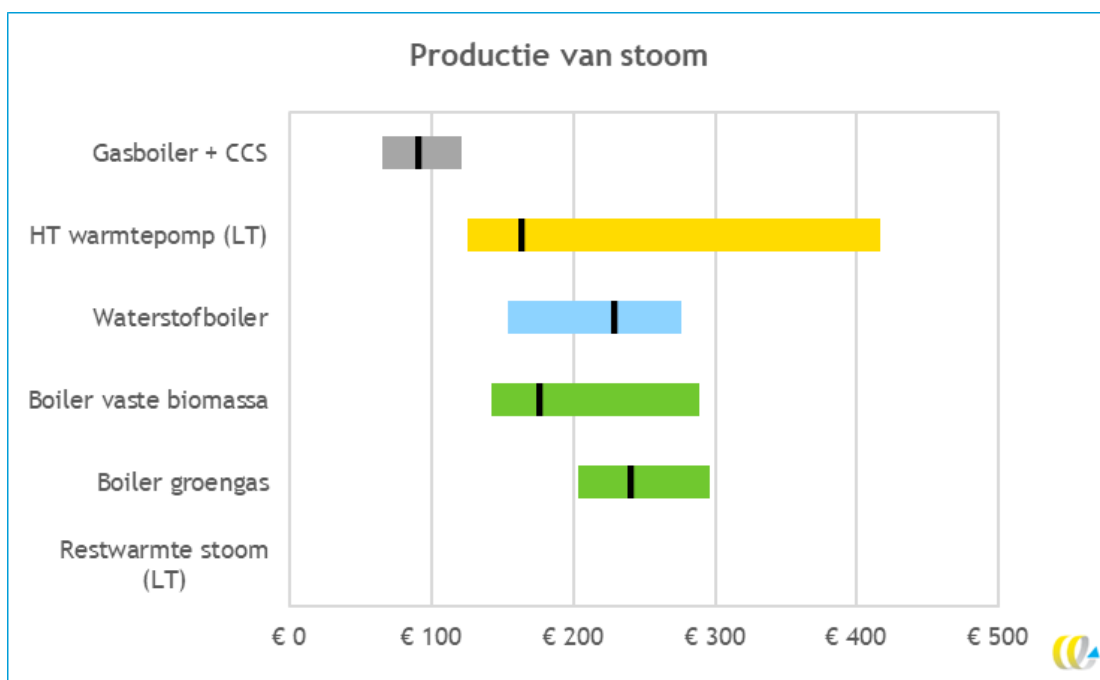
De **waterstofboiler** is met 154/227/276 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario duidelijk duurder dan CCS.

De **boiler op vaste biomassa** heeft een subsidie-intensiteit van 142/174/289 €/ton CO₂. De middenwaarde is vergelijkbaar met de HT-warmtepomp, rond twee keer de kosten van CCS. De onderwaarde van de biomassa-boiler is nog altijd hoger dan de bovenwaarde van CCS. Deze subsidie-intensiteit is bepaald voor het verstoffen van relatief dure houtpellets, omdat de SDE++ geen categorie heeft voor stoomproductie uit andere types biomassa. Een installatie op goedkoper B-hout, houtsnippers of snoeiafval heeft een lagere kosten-effectiviteit dan CCS, als de overige kosten gelijk zouden blijven. Het is echter niet bekend of de overige kosten inderdaad gelijk blijven. Het zou namelijk ook kunnen dat installaties op B-hout of houtsnippers duurder zijn of hogere onderhoudskosten hebben. Daarbij zijn snoeiafval en B-hout restproducten waarbij het waarschijnlijk niet mogelijk is om extra aanbod te creëren op de schaal die nodig is om CCS te vervangen. Voor houtsnippers is dat waarschijnlijk wel mogelijk.

De **boiler op groen gas** is een stuk duurder dan de andere alternatieven: 474/387/344 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario. Zoals in Paragraaf 4.1.2 besproken is de subsidie-intensiteit *hogere* in het *Laag*-scenario omdat de opbrengsten sterk dalen door een dalende gasprijs, terwijl de kosten nauwelijks dalen omdat de prijs van biomassa reststromen als vast wordt verondersteld.

Voor **restwarmtestoom** is geen subsidie-intensiteit bepaald omdat deze techniek is uitgesloten van de SDE++. De reden hiervan is dat de uitkoppeling van reststoom wordt verondersteld kosteneffectief te zijn. De onrendabele top is dus ten hoogste nul. Het gebruik van reststoom van een nabijgelegen bedrijf is dus altijd kosteneffectiever dan CCS. Dit vormt echter geen algemeen alternatief voor CCS omdat de meeste bedrijven niet gelegen zijn naast een bedrijf dat stoom over heeft.

Figuur 2 - Resultaten subsidie-intensiteit voor de productie van stoom

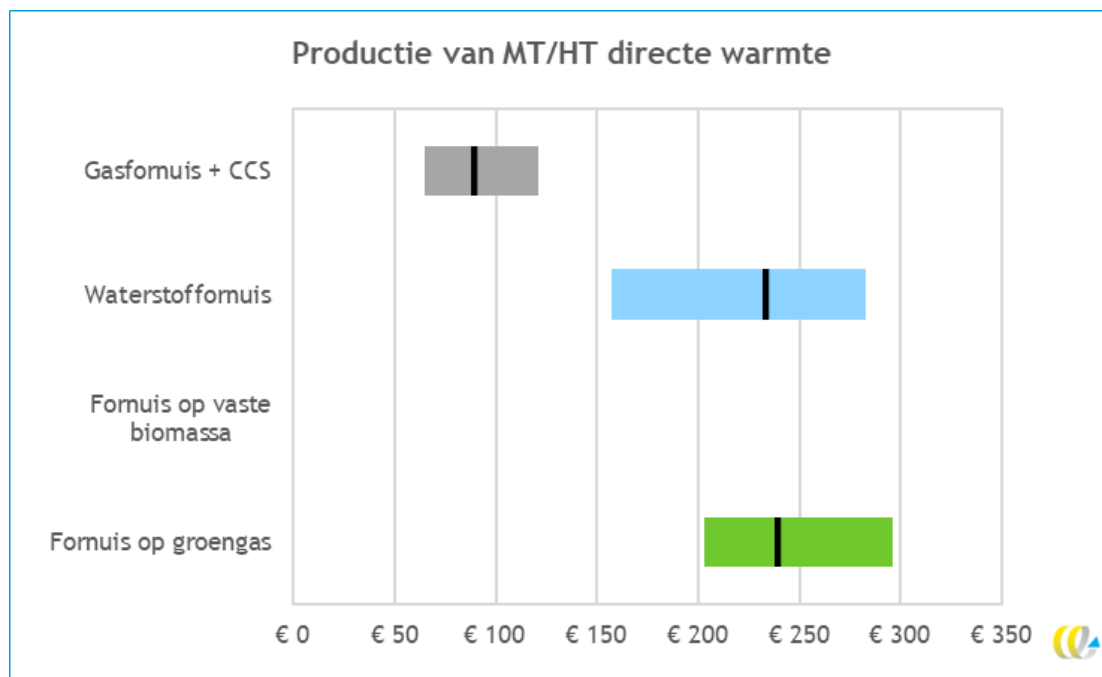


De technieken gemarkeerd met (LT) zijn alleen toepasbaar voor de productie van lagetemperatuurstoom.

4.2.2 Productie van MT/HT directe warmte

Er is geen duurzaam alternatief dat een lagere subsidie-intensiteit heeft dan het aardgas-gestookte procesfornuis met post-combustion CCS, zie Figuur 3. Deze CCS-techniek heeft een subsidie-intensiteit van 65/88/121 €/ton in het Laag/Midden/Hoog-scenario.

Figuur 3 - Resultaten subsidie-intensiteit voor directe warmte



Het **fornuis op waterstof** heeft een subsidie-intensiteit van 157/232/283 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario, duidelijk meer dan het CCS-alternatief. Dit zijn vrijwel dezelfde waarden als de boiler op waterstof. Het fornuis heeft een iets lager rendement, maar ook lagere ombouwkosten.

Het **fornuis op vaste biomassa** is niet weergegeven in de grafiek omdat er geen betrouwbare kostendata gevonden kon worden. We verwachten dat de subsidie-intensiteit ongeveer gelijk is aan die van de boiler op vaste biomassa, aangezien de techniek grote overeenkomsten kent. Het fornuis op vaste biomassa zou dan duidelijk duurder zijn dan het CCS-alternatief.

Het **fornuis op groen gas** heeft dezelfde subsidie-intensiteit als de overige technieken op groen gas en is duidelijk duurder dan fossiel met CCS.

4.2.3 Indampen van waterige oplossingen

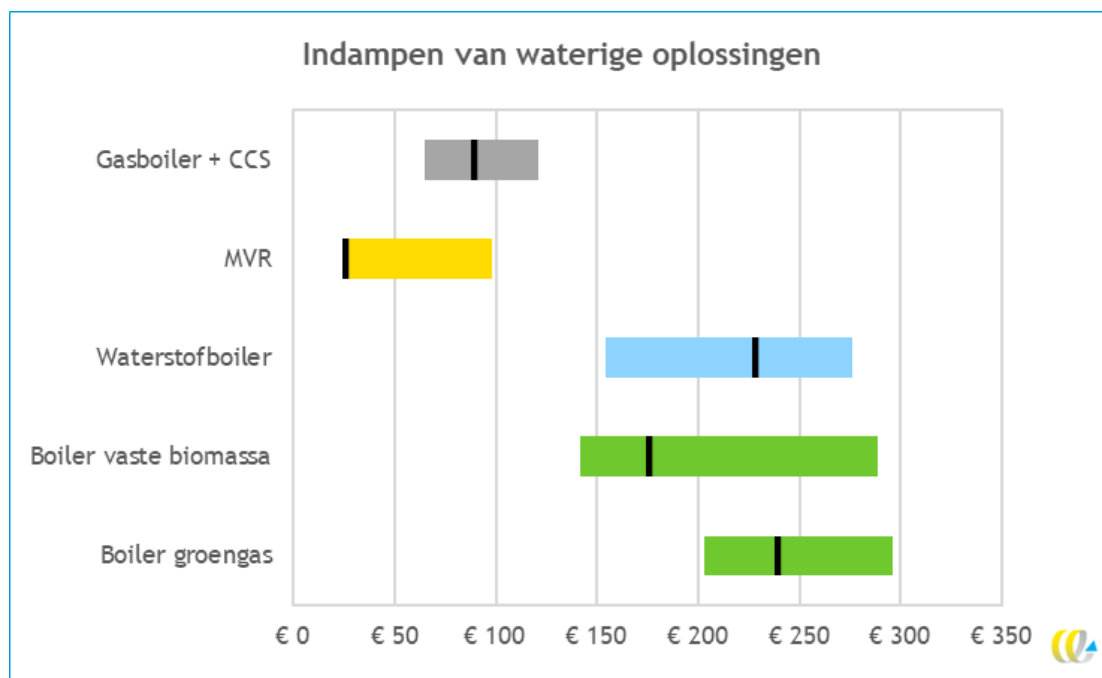
Het indampen van waterige oplossingen gebeurt met een meertrapsverdamper, aangedreven door stoom. Het is zowel mogelijk om de stoomproductie te verduurzamen als het proces zelf aan te passen.

Stoomrecompressie (MVR) gebruikt de reststoom uit de laatste trap van de verdamper. Deze stoom wordt normaal 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 MVR heeft met 45/24/98 €/ton CO₂ in het Laag/Midden/Hoog-scenario de laagste subsidie-intensiteit van alle beschouwde technieken voor het indampen van oplossingen, zie Figuur 4. De overige technieken zijn hetzelfde als voor de productie van stoom, zie Paragraaf 4.2.1. Dit komt omdat het indampen gebeurt met meertraps verdamper, die worden aangedreven

door stoom. De MVR hergebruikt interne restwarmte, terwijl de overige technieken de stoomproductie verduurzamen.

De subsidie-intensiteit van MVR is beduidend lager dan die van CCS. MVR is algemeen toepasbaar voor indampingsinstallaties en is dus een echt alternatief voor CCS. De MVR scoort met name goed door het hoge rendement: de MVR zit in de SDE als 'openluswarmtepomp' met een rendement van 700% geproduceerde stoom per eenheid gebruikte elektriciteit.

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



4.2.4 Compressie van gassen

Voor de compressie van gassen is de referentietechniek een compressor aangedreven door een tegendruk stoomturbine. Alternatieven voor de stoomturbine zijn niet door de voorselectie gekomen, dus de enige verduurzamingsopties richten zich op de verduurzaming van de productie van stoom. Zie de resultaten voor de productie van stoom in Paragraaf 4.2.1.

4.2.5 Productie van waterstof

Voor de productie van waterstof zijn vier varianten van CCS beschouwd, productie van groene waterstof met elektrolyse en productie van waterstof door stoom reforming (SMR) van groen gas.

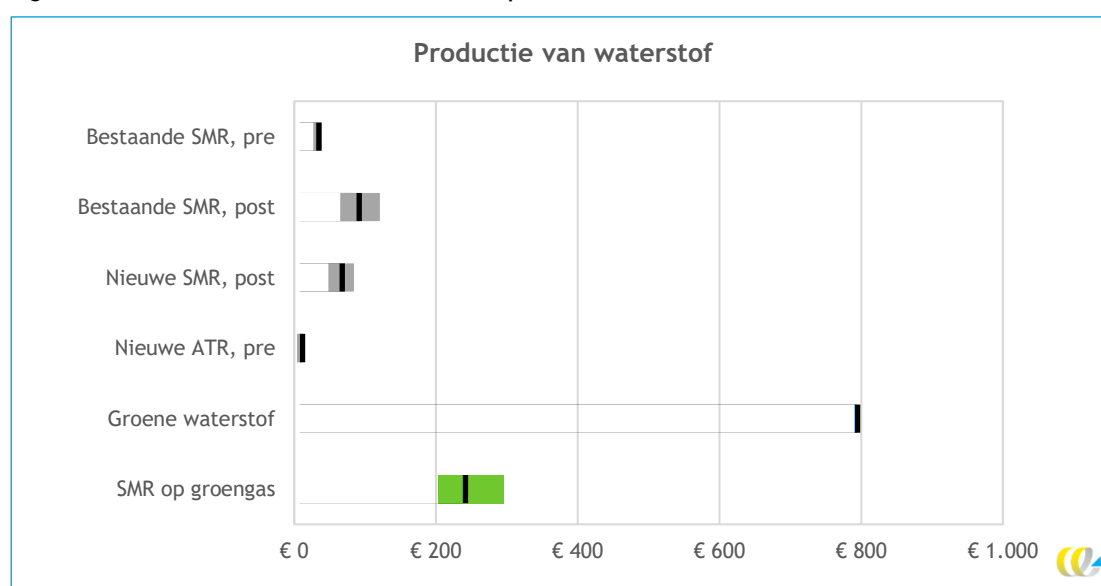
De CCS-opties hebben met afstand de laagste subsidie-intensiteit, in de regio van 0-100 €/ton CO₂.

De productie van **groene waterstof** heeft een subsidie-intensiteit van bijna 800 €/ton CO₂. Dit komt door de hoge investeringskosten van de zonnepanelen, windmolens, elektrolyzers en randapparatuur, en de relatief geringe emissiereductie ten opzichte van fossiel. De spreiding is opvallend klein omdat het verschil in opbrengsten door verkoop van water-

stof vrijwel precies gecompenseerd wordt door het verschil in kostprijs in de Laag- en Hoog-scenario's. De kostprijs varieert door de variatie in investeringskosten, financieringskosten (WACC), vollasturen en onderhoudskosten. De opbrengsten worden bepaald door de spreiding in de gasprijs van -43%/+22%, terwijl de spreiding in de kosten -36%/+20% bedraagt, vrijwel identiek dus.

De **SMR op groen gas** is technisch identiek aan de SMR op aardgas, de meest gebruikte techniek voor de productie van waterstof. De SMR op groen gas is fors duurder omdat de kosten voor de productie van groen gas veel hoger zijn dan de marktprijs van aardgas.

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



4.3 Terugvertaling naar SDE-categorieën

In onze methode hebben we gekozen voor een aanpak gericht op industriële processen, in plaats van technieken. Dit geeft ons meer inzicht in de duurzame alternatieven die er voor concrete processen beschikbaar komen. Aan de andere kant werkt de SDE met brede technieken (categorieën). Alleen een SDE-categorie kan worden uitgesloten van subsidie. Wanneer een kosteneffectief alternatief wordt aangetroffen, kan subsidie hiervoor dus alleen worden stopgezet als dit alternatief van toepassing is voor een gehele SDE-categorie.

In de voorgaande sectie hebben we stoomrecompressie (MVR) geïdentificeerd als kosteneffectief duurzaam alternatief voor CCS voor installaties die waterige oplossingen indampen. Dit proces moet dus terugvertaald worden naar een SDE-categorie zodat er niet langer subsidie verstrekt kan worden voor CCS in deze toepassing.

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

Post-combustion afvang bij bestaande industriële installaties wordt echter zeer breed toegepast, niet alleen bij het indampen van oplossingen. Sterker nog, in de voorgaande

sectie hebben we diverse processen geïdentificeerd waar post-combustion CCS het meest kosteneffectieve alternatief is. Het is dus niet zonder meer mogelijk om categorie 5A dicht te zetten omdat er voor een specifiek proces (indampen) een duurzaam alternatief gevonden is.

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

Het is dus niet mogelijk om een SDE-categorie te identificeren of te creëren die enkel de toepassing van CCS bij de productie van stoom voor het indampen van oplossingen betreft. Het is daarom niet mogelijk om CCS in deze toepassing uit te sluiten van subsidie.

4.4 Beschouwing op de resultaten

4.4.1 Waar is er echt een alternatief voor CCS?

In deze paragraaf nemen we iets meer afstand van de individuele technieken en processen en schetsen we een beeld van waar er nu wel en niet een alternatief is voor CCS.

Alles overziend kunnen we de sectoren en technieken indelen in drie categorieën:

1. **Wel een kosteneffectief alternatief voor CCS, maar geen plannen voor CCS** - Voor het indampen van oplossingen is er een kosteneffectief alternatief, namelijk stoom-recompressie (MVR). Grootschalig indampen wordt met name toegepast in de suiker- en zoutindustrie, waar geen concrete plannen speelden voor CCS. Dit wordt bevestigd doordat Nobian in haar intentieverklaring voor maatwerkafspraken aangeeft in te willen zetten op MVR (Nobian, 2022). Een soortgelijk argument gaat ook op voor de hogetemperatuurwarmtepomp, al is die nog niet rendabel ten opzichte van CCS.
2. **Wel plannen voor CCS, maar geen kosteneffectief alternatief** - In de raffinage, kunstmest, organische basischemie en industriële gassenindustrie (waterstof-productie) zijn concrete plannen voor CCS. We hebben echter gezien dat er geen kosteneffectieve alternatieven zijn voor hogetemperatuurwarmte en de productie van waterstof. De zeef weerhoudt deze sectoren er dus niet van om subsidie te ontvangen voor het toepassen van CCS.
3. **Er is geen alternatief voor CCS, maar CCS is wenselijk** - Dit geldt voor veel sectoren die buiten de scope van de zeefstudie vallen, zoals afvalverbranding, de productie van waterstof uit restgassen en CCS bij installaties die biomassa verbranden. Gegeven deze processen, is CCS hier de enige manier om te voorkomen dat de CO₂ vrijkomt in de atmosfeer of om negatieve emissies te realiseren.

Kort gezegd: onze analyse laat zien dat waar er een kosteneffectief alternatief is voor CCS, er geen concrete plannen voor CCS bestaan en waar men van plan is CCS toe te passen, er op dit moment geen kosteneffectief alternatief is. Dat betekent dat de zeef op dit moment niet bijstuurt (door subsidie voor CCS in bepaalde gevallen tegen te houden), maar dat deze bijsturing ook niet nodig is omdat kosteneffectieve alternatieven voor CCS waar mogelijk al worden toegepast.

4.4.2 Combinaties van technieken

Hoewel de methode van de zeef wel ruimte biedt voor combinaties van technieken, zijn die in deze toepassing van de methode voor 2023 niet gevonden. De combinaties die we hebben onderzocht, bestaan uit:

1. Een alternatieve techniek die *alle* emissies vermijdt. En
2. Een techniek die een deel van de emissies vermijdt en een lagere subsidie-intensiteit heeft dan zowel CCS als het alternatief onder punt 1 hierboven.

Er zijn geen technieken geïdentificeerd die aan punt 1 voldoen. De technieken die *alle* emissies vermijden, zijn boilers/fornuizen op biomassa, groen gas of waterstof en de productie van groene waterstof of waterstof uit groen gas. Al deze technieken hebben een (beduidend) hogere subsidie-intensiteit dan CCS.

De technieken die een deel van de emissies kunnen vermijden, zijn MVR en de hogetemperatuurwarmtepomp:

- De HT-warmtepomp heeft een duidelijk hogere subsidie-intensiteit dan CCS. Een combinatie van de HT-warmtepomp en een van de technieken uit de vorige paragraaf zal dus altijd een hogere subsidie-intensiteit hebben dan CCS.
- De MVR haalt de vereiste emissiereductie van 80% ook zonder combinatie met een techniek die de stoomvraag verduurzaamt en daarmee alle emissies vermijdt.

5 Inbedding in breder beleid

5.1 Inleiding

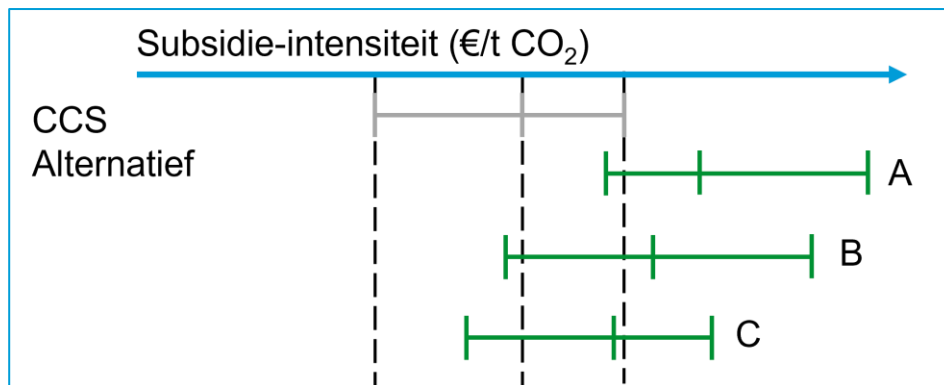
In onze zeefmethodiek hebben we aandacht besteed aan de inbedding van de zeef in breder (duurzaamheids)beleid. We hebben een methode voorgesteld om een nadere analyse uit te voeren op de duurzame alternatieve technologieën die een kosteneffectiviteit hebben die vergelijkbaar is met die van CCS. Dit doen we door kansrijke alternatieven (en CCS zelf) te toetsen op andere aspecten dan kosteneffectiviteit, die van invloed kunnen zijn op het eventuele besluit van EZK om een SDE-categorie uit te sluiten van subsidie. Daarnaast hebben we kort beschreven hoe informatie uit de zeefstudie gebruikt kan worden voor het innovatie- en duurzaamheidsbeleid.

Hierna gaan we eerst in op de selectie van kansrijke alternatieven voor de nadere analyse en voeren we deze uit. Daarna bespreken we welke technologieën uit onze studie volgen als de meest veelbelovende alternatieven voor de belangrijkste processen, en hoe deze eventueel verder gestimuleerd kunnen worden.

5.2 Selectie van kansrijke alternatieven

Conform onze methode 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 of een betere kosteneffectiviteit hebben dan 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 6.

Figuur 6 - Schematische weergave van de bandbreedte van de subsidie-intensiteit van CCS en verschillende duurzame alternatieve technologieën (A, B en C)



Echter, uit het overzicht van de kosteneffectiviteit van de verschillende onderzochte alternatieven (zie Paragraaf 4.2) blijkt dat dit type overlap niet voorkomt. MVR is de enige techniek met een subsidie-intensiteit die lager ligt dan die van CCS. Van alle andere alternatieven overlapt de bandbreedte van de subsidie-intensiteit niet met die van CCS (dus ook type A en B uit de figuur komen niet voor).

Omdat wij de nadere analyse als een belangrijk onderdeel van onze methode beschouwen, en er bij een volgende iteratie van de zeefstudie wel alternatieven van type C kunnen voorkomen, kiezen we ervoor om de analyse ter illustratie toch uit te voeren voor enkele relatief kansrijke alternatieven. We kiezen ervoor om dit te doen voor CCS als referentie en voor de duurzame alternatieven MVR, de HT-warmtepomp en de boiler op vaste biomassa. De bandbreedte van de subsidie-intensiteit van deze laatste twee technologieën overlapt bijna met die van CCS. Het is echter belangrijk om in het oog te houden dat de middenwaarde van de subsidie-intensiteit in beide gevallen significant hoger ligt dan die van CCS. Het zou dus onjuist zijn om te stellen dat deze alternatieven een *vergelijkbare* kosten-effectiviteit hebben. Ook als uit de nadere analyse zou volgen dat deze alternatieven op andere (beleids)aspecten dan kosteneffectiviteit belangrijke voordelen hebben ten opzichte van CCS, ligt het daarom niet voor de hand om op grond van deze alternatieven SDE-categorieën voor CCS uit te sluiten van subsidie.

5.3 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 5 is samenvattend weergegeven op welke manier de verschillende aspecten relevant kunnen zijn voor de vier 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.

Tabel 5 - Relevantie van de verschillende aspecten van de nadere analyse voor CCS en drie geselecteerde duurzame alternatieven

Aspect Technologie	CCS	MVR	HT-warmtepomp	Boiler vaste biomassa
Bandbreedte subsidie-intensiteit	Relatief kleine bandbreedte	Relatief kleine bandbreedte	Grote bandbreedte, kosten onzeker	Relatief grote bandbreedte
Beschikbaarheid infrastructuur	CO ₂ -infrastructuur vaak nog niet aanwezig	Mogelijk nieuwe aansluiting nodig	Netcongestie kan elektrificatie belemmeren	Transport biomassa kan per schip/spoor/weg
Beschikbaarheid grondstoffen	-		Elektriciteit is nog niet 100% hernieuwbaar	Beschikbaarheid biomassa beperkt
Milieueffecten incl. ketenemissies	Fossiele productieketen blijft in stand; aanleg infra veroorzaakt stikstofuitstoot	Nagenoeg geen uitstoot naar de omgeving	Nagenoeg geen uitstoot naar de omgeving; wel stikstofuitstoot bij aanleg nieuwe infra voor elektriciteit	Uitstoot stikstof en fijnstof bij verbranding; transport biomassa levert ook uitstoot op; druk op biodiversiteit
Ruimte-effecten	Ruimte nodig voor compressorstation. Leidingen ondergronds	-	Mogelijk ruimte nodig voor extra elektriciteitsinfra	Biomassa legt groot beslag op (buitenlands) landgebruik
Maatschappelijk draagvlak	Publieke opinie redelijk neutraal, sommige ngo's zijn	-	-	Duurzaamheid biomassa wordt betwist, mogelijke

Aspect Technologie	CCS	MVR	HT-warmtepomp	Boiler vaste biomassa
	kritisch. CCS wordt niet als duurzame oplossing beschouwd			nadelige effecten voor landgebruik en biodiversiteit
Overige beleidsdoelen	CCS is een tijdelijke oplossing om op korte termijn emissiereductie te bewerkstelligen waar geen alternatief bestaat. Zonder tijdige afbouw niet in lijn met doelstelling circulaire economie en kabinetsvisie fossielvrije toekomst	Draagt bij aan doelen voor energiebesparing	Draagt bij aan doelen voor energiebesparing	Mogelijke spanning met doelen op het gebied van biodiversiteit
Geopolitieke aspecten, waaronder energie-zekerheid	Mogelijk concurrentie om opslagcapaciteit. Afhanke-lijkheid van fossiele brandstoffen wordt in stand gehouden.	Positief voor energie-zekerheid: elektriciteit kan binnen EU opgewekt worden; gasbesparingen	Positief voor energie-zekerheid: elektriciteit kan binnen EU opgewekt worden; gasbesparingen	Biomassaproductie binnen Nederland onvoldoende voor eigen gebruik
Technologie-specifieke belemmeringen	CO ₂ -opslagpotentieel is eindig	-	Inpassen in proces is vaak lastig	-

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

CCS

Uit de figuren in Paragraaf 4.2 blijkt dat de **bandbreedte van de subsidie-intensiteit** voor CCS relatief gering is, vergeleken met die van de meeste duurzame alternatieven. De kans op (negatieve) verrassingen in de werkelijke kosteneffectiviteit bij het ontwikkelen van een CCS-project is daarmee dus *relatief* klein.

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 (EBN & Gasunie, 2018). Hiervoor zijn andere partijen betrokken dan de partij die de afvang verzorgt (CE Delft et al., 2018). Omdat de aanleg hiervan gepaard gaat met (tijdelijke) stikstofuitstoot is op dit moment onduidelijk op welke termijn de infrastructuur die noodzakelijk is voor groot-schalige CCS-projecten in Nederland, zoals Porthos, gerealiseerd kan worden (Blommensteijn, 2022).

Wat betreft **milieueffecten** geeft CCS een gemengd beeld. De uitstoot van stikstof en fijnstof door de installatie zelf neemt (bij post-combustion CCS) 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. Dit leidt op meerdere manieren tot blijvende CO₂-uitstoot: niet alle CO₂ kan worden afgevangen bij een

CCS-installatie; upstream in de keten blijven emissies bestaan, zoals bij het transport van fossiele brandstoffen en methaanlekkages; en tot slot is er voor de afvang van CO₂ veel elektriciteit nodig, die nu vaak nog fossiel wordt opgewekt (CE Delft, 2020, CE Delft et al., 2018).

Het bovengrondse **ruimtebeslag** van CCS is beperkt, omdat de pijpleidingen grotendeels ondergronds lopen. Wel is er ruimte nodig voor de installaties aan de uiteinden van de pijpleidingen, met name het compressorstation (ca. 5-7 ha bij opslag van 7-8 Mton/jaar) (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).

Ondanks de belangrijke rol van CCS in het bereiken van klimaatneutraliteit wringt de toepassing van CCS bij fossiele industriële processen wel op een aantal punten met **andere beleidsdoelen**. Het kabinet geeft in het Coalitieakkoord aan dat Nederland in de toekomst klimaatneutraal, fossielvrij en circulair zou moeten zijn (VVD et al., 2021). Fossiel met CCS draagt wel bij aan klimaatneutraliteit en het behalen van de emissiereductiedoelstellingen voor de industrie, maar leidt tot de instandhouding van het gebruik van fossiele brandstoffen in de industrie. Ook kan CO₂ worden gezien als een afvalproduct, en is CCS daarmee niet in lijn met het doel van een circulaire economie in 2050 (CE Delft et al., 2018). Derhalve wordt de inzet van CCS bij fossiele processen als een tijdelijke maatregel gezien.

CCS kent zowel positieve als negatieve **geopolitieke aspecten**. 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 in de toekomst (binnen de EU) concurrentie om goede 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, al is dit nu nog niet aan de orde omdat CCS nog maar beperkt wordt toegepast in Europa.

Mechanical Vapour Recompression (MVR)

Uit Figuur 4 blijkt dat MVR een relatief kleine **bandbreedte van de subsidie-intensiteit** heeft, iets groter dan die van CCS. Er is voor MVR geen specifieke **infrastructuur** nodig. Wel kan het zijn dat er een nieuwe, grotere elektriciteitsaansluiting nodig is voor de installatie.

De techniek heeft geen andere **grondstof** nodig dan elektriciteit. Door gebruik te maken van hernieuwbare elektriciteit kan MVR een volledig duurzame technologie zijn (Klop, 2015). Voorlopig is de elektriciteitsmix in Nederland nog niet volledig hernieuwbaar, maar vanwege de hoge efficiëntie (zie Paragraaf 4.2.3) is MVR ook op basis van de huidige emissiefactor schoner dan het alternatief.

MVR scoort positief op **milieueffecten**, omdat er nagenoeg geen uitstoot naar de omgeving plaatsvindt. Als de elektriciteit duurzaam wordt opgewekt, vindt ook daar geen uitstoot plaats.

Omdat MVR een erg efficiënte techniek is vormt het niet alleen een duurzaam alternatief, maar leidt het ook tot energiebesparing (Klop, 2015). De technologie draagt daarmee bij aan **beleidsdoelen** (nationaal en Europees) op het gebied van energiebesparing en versterkt de **energiezekerheid** in Europa, omdat de afhankelijkheid van gas afneemt en hernieuwbare elektriciteit binnen Europa kan worden opgewekt.

Hogetemperatuurwarmtepomp

De **bandbreedte in de subsidie-intensiteit** is voor de HT-warmtepomp nog relatief hoog (Figuur 2). Dat betekent dat de scenario's die wij voor de bandbreedte hanteren een groot verschil in subsidie-intensiteit laten zien.

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.

Door gebruik te maken van hernieuwbare elektriciteit (de '**grondstof**') kan de HT-warmtepomp als een volledig duurzame technologie beschouwd worden (Bantle, 2022). Die hernieuwbare elektriciteit moet dan dus wel beschikbaar zijn.

De **milieueffecten** van een HT-warmtepomp zijn op zichzelf positief omdat er nagenoeg geen uitstoot meer optreedt. Als er extra infrastructuur moet worden aangelegd om aan de elektriciteitsvraag te voldoen levert dat wel tijdelijk stikstofuitstoot op. Een HT-warmtepomp kan een beperkt **ruimtebeslag** met zich meebrengen omdat er extra elektriciteitsinfrastructuur moet worden aangelegd om de aansluiting te realiseren.

Omdat een warmtepomp efficiënter is dan bijvoorbeeld een gasboiler draagt deze oplossing ook bij aan **beleidsdoelen** op het gebied van energiebesparing en **energiezekerheid**.

Een HT-warmtepomp kent wel een belangrijke **technologie-specifieke belemmering**, namelijk het feit dat het productieproces zelf ook aangepast moet worden om de warmtepomp in het bestaande proces te integreren. Dit vergt investeringen en tijd en vereiste diepgaande kennis van het eigen productieproces.

Boiler vaste biomassa

De **bandbreedte in de subsidie-intensiteit** van een boiler op basis van vaste biomassa is relatief groot, maar niet zo groot als bij de HT-warmtepomp (zie Figuur 2).

Voor het vervoer van biomassa zijn meerdere bestaande opties mogelijk, zoals weg, spoor of schip, en er hoeft dus geen specifieke **infrastructuur** voor te worden aangelegd. Wel kan het vervoer van biomassa zelf uiteraard emissies met zich meebrengen (zie onder).

De **beschikbaarheid** van (duurzame) biomassa is een van de grote knelpunten bij deze technologie. 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. Hier zijn al veel studies over gepubliceerd, waaronder die van Natuur & Milieu, (2020), de SER, (2020) en CE Delft & Royal HaskoningDHV, (2020). Welke biomassa als duurzaam geldt wordt vooral bepaald door wetgeving op EU-niveau, met name de (herziene) Richtlijn Hernieuwbare Energie (EC, 2021).

De verbranding van biomassa in een boiler heeft meerdere **milieueffecten** binnen de keten. Ten eerste leidt deze verbranding tot de uitstoot van CO₂, stikstofoxiden en fijnstof. Ten tweede kan, zoals hierboven al genoemd, ook het vervoer van biomassa van de bron naar de installatie allerlei emissies met zich meebrengen, met name als dit via de weg of per schip gebeurt. Ten derde kan nieuwe productie van biomassa tot veranderingen in landgebruik leiden, die op hun beurt bijvoorbeeld verlies van biodiversiteit kunnen veroorzaken (Natuur & Milieu, 2020). Maar ook de bestaande productie gaat legt een groot beslag op het landgebruik en heeft daarmee een omvangrijk **ruimte-effect**.

Vanwege bovenstaande milieueffecten en vanwege twijfel over de duurzaamheid van het opwekken van energie met behulp van biomassa staat het **maatschappelijk draagvlak** voor biomassa onder druk. Veel milieugerelateerde ngo's zijn kritisch op het (grootschalige) gebruik van biomassa en plannen voor biomassacentrales worden sceptisch ontvangen door omwonenden (Bianchi, 2019).

Over de vraag of het gebruik van biomassa in strijd is met **andere beleidsdoelen** verschillen de meningen. Binnen het Europese wettelijke kader is biomassa een belangrijk onderdeel van de toekomstige energiemix, en is duurzaamheid gegarandeerd zolang de criteria en de biomassa-ladder voor een efficiënt gebruik van de beschikbare biomassa uit de Richtlijn Hernieuwbare Energie (EC, 2021) worden geëerbiedigd. Voor de kritische ngo's is dit niet voldoende en is het verbranden van biomassa niet in lijn met de klimaatdoelen en de inzet op het behoud van biodiversiteit.

Tot slot is de productie van biomassa eindig en is het de vraag wat dat betekent voor de **geopolitieke verhoudingen**. De scenario's voor behoefte en beschikbaarheid van duurzame biomassa verschillen sterk, afhankelijk van definities en aannames. Volgens het onderzoek van CE Delft & Royal HaskoningDHV, (2020) is de kans groot dat Nederland meer biomassa nodig zal hebben dan het zelf kan produceren. Op EU-niveau blijft de beschikbaarheid voldoende, maar Nederland zal dus een claim moeten leggen op de biomassaproductie van andere landen om in de eigen behoefte te kunnen voorzien.

5.4 Kansrijke alternatieven voor de belangrijkste processen

Uit onze zeefstudie is gebleken dat er één duurzame alternatieve technologie nu al kosten-effectiever is dan CCS, namelijk MVR. Daarnaast is er uit de analyse een aantal kansrijke alternatieven gekomen dat zich waarschijnlijk op de wat langere termijn qua kosten-effectiviteit met CCS kan gaan meten. Deze informatie kan gebruikt worden om een beeld te krijgen van de meest waarschijnlijke route naar verduurzaming in de verschillende sectoren, en waar nodig die ontwikkeling dan ook gericht te stimuleren. We staan hierna kort stil bij de meest kansrijke alternatieven voor de vier hoofdprocessen zoals die behandeld zijn in Paragraaf 4.2.

Voor de **productie van stoom** (inclusief voor de compressie van gassen) is CCS nog de meest kosteneffectieve optie, maar zijn er alternatieven in beeld die de komende jaren waarschijnlijk interessanter gaan worden.

De **HT-warmtepomp** lijkt op termijn een aantrekkelijk alternatief voor de productie van LT-stoom. Uit de nadere analyse blijkt dat mogelijke uitdagingen vooral te maken hebben met de beschikbaarheid van voldoende hernieuwbare elektriciteit en met het feit dat de installatie moet worden omgebouwd. De bandbreedte in de subsidie-intensiteit is daarnaast relatief hoog (zie Figuur 2). Dit kan niet één-op-één gerelateerd worden aan een grote onzekerheid in de kosten, omdat we met onzekerheidsscenario's werken waarin ook andere grootheden een rol spelen en op elkaar inwerken. In feite zijn de kosten van de HT-warmtepomp echter wel relatief onzeker. Dat komt onder andere doordat de HT-warmtepomp nu niet is opgenomen in de SDE en er daarom ook geen marktconsultatie door PBL heeft plaatsgevonden. Om bedrijven meer inzicht te geven in de mogelijkheden die een HT-warmtepomp biedt adviseren wij daarom om nader onderzoek te doen naar de investeringskosten hiervoor, via een marktconsultatie of anderszins.

Een **boiler op vaste biomassa** zou ook een alternatief kunnen zijn voor de productie van stoom. Deze technologie is nog niet zo kosteneffectief als CCS, maar daarbij moet aangetekend worden dat het OT-model uitgaat van het gebruik van houtpellets, wat een relatief dure vorm van vaste biomassa is. Een boiler op basis van andere typen vaste biomassa, zoals snoeihout, B-hout of houtsnippers, is mogelijk kosteneffectiever. De beschikbaarheid van snoeihout en B-hout op een schaal waarbij CCS kan worden toegepast is waarschijnlijk ontoereikend, maar de optie van houtsnippers zou nader onderzocht kunnen worden.

De nadere analyse laat zien dat grootschalig gebruik van biomassa, naast de beschikbaarheid, tegen een aantal uitdagingen aanloopt op het gebied van nadelige milieueffecten en maatschappelijke twijfels over de geschiktheid en wenselijkheid van biomassa als duurzaam alternatief voor de productie van energie.

Een ander duurzaam alternatief voor de opwekking van stoom, ook bij hoge temperatuur en druk, is de **e-boiler**. De CO₂-reductie die een e-boiler bereikt is op dit moment nog onder de grenswaarde van 80%, en daarom is de kosteneffectiviteit van deze optie in deze zeefstudie niet geëvalueerd. De CO₂-reductie hangt af van de mate waarin de elektriciteit op het net hernieuwbaar is. In Bijlage C.1.3 wordt uitgelegd dat de e-boiler waarschijnlijk vanaf 2028 meer dan 80% CO₂-reductie met zich meebrengt en de onrendabele top dan waarschijnlijk beperkt is. Omdat de bereikte CO₂-reductie vooral afhangt van de emissiefactor van het elektriciteitsnet zijn er (binnen het innovatiebeleid) weinig opties om dit te versnellen.

Het gebruik van **reststoom** (c.q. restwarmte voor de productie van stoom) is tot slot, wanneer beschikbaar, altijd een goede optie. Deze wordt zelfs altijd als kosteneffectief beschouwd. De beschikbaarheid hiervan hangt echter sterk af van de productielocatie en daarom kan reststoom niet als algemeen toepasbaar alternatief beschouwd worden.

Voor de productie van **LT en HT directe warmte** lijkt een specifiek duurzaam alternatief voorlopig niet binnen handbereik. Daarvoor is breder onderzoek op de langere termijn noodzakelijk. Voor de optie van het **fornuis op vaste biomassa** hebben we onvoldoende gegevens in de literatuur kunnen vinden om de kosteneffectiviteit vast te stellen. Hier zou ook nader onderzoek naar kunnen worden gedaan, al zal de kosteneffectiviteit waarschijnlijk vergelijkbaar zijn met de boiler op vaste biomassa.

Voor het **indampen van waterige oplossingen** bestaat zoals gezegd al een kosteneffectief duurzaam alternatief, namelijk **MVR**. Er zijn geen aanwijzingen dat bedrijven toch voor CCS kiezen als MVR toegepast kan worden.

Voor de **productie van waterstof**, tot slot, zijn nog geen kosteneffectieve alternatieven in beeld. **Productie van waterstof met groengas** is het goedkoopste alternatief, maar nog steeds significant duurder omdat de productie van groengas nog veel duurder is dan de

marktprijs van aardgas. **Productie van groene waterstof** kan zich met een subsidie-intensiteit van bijna € 800 per ton CO₂ voorlopig nog minder met CCS meten qua kosteneffectiviteit. Daarvoor zouden de hoge investeringskosten van zonnepanelen, windmolens, elektrolyzers en randapparatuur eerst sterk moeten dalen.



6 Conclusies

Hoofdconclusie

In dit rapport hebben we onze herziene zeefmethodiek (CE Delft, 2022) toegepast met het oog op de SDE-subsidieronde van 2023. De hoofdvraag van dit onderzoek was of er op dit moment aantoonbaar duurzame kosteneffectieve alternatieven bestaan voor CCS.

We hebben één kosteneffectief alternatief gevonden, namelijk Mechanical Vapour Recompression (MVR), dat gebruikt kan worden voor het indampen van waterige oplossingen. De subsidie-intensiteit hiervan is € 24 per ton CO₂ volgens het OT-model, tegen € 88 voor een gasboiler gecombineerd met CCS.

Omdat de SDE met technologieën (SDE-categorieën) werkt en niet met processen, is het niet mogelijk om alleen voor dit specifieke proces geen subsidie voor CCS toe te staan. Tegelijkertijd zijn er ook geen aanwijzingen dat de betreffende bedrijven CCS zouden willen toepassen in plaats van MVR.

Nadere beschouwing

In onze herziene methode voor de zeef hebben we een procesbenadering gehanteerd in plaats van een technologie-benadering. In deze zeefstudie voor 2023 is gebleken dat kosteneffectieve alternatieven voor specifieke processen, zoals MVR voor het indampen van waterige oplossingen, daardoor makkelijker worden geïdentificeerd. Tegelijkertijd is het lastig om zo'n proces één-op-één aan een SDE-categorie te koppelen. Subsidie voor CCS voor een specifiek proces kan daarom niet makkelijk uitgesloten worden. Dat hoeft echter geen probleem te vormen: we hebben gezien dat op dit moment geen CCS wordt overwogen daar waar een kosteneffectief alternatief bestaat, en waar CCS wel wordt overwogen geen kosteneffectief alternatief bestaat. Dit zou natuurlijk in de toekomst wel kunnen veranderen.

Onze analyse heeft laten zien dat, behalve MVR dat al kosteneffectiever is dan CCS, er geen alternatieven zijn die op dit moment vlak in de buurt zitten van CCS qua kosteneffectiviteit. Er is dus geen sprake van alternatieven die nog niet helemaal zo kosteneffectief zijn als CCS maar op grond van andere overwegingen wellicht toch een reden kunnen zijn om geen subsidie voor CCS toe te kennen. De nadere analyse van Hoofdstuk 5 was daarom in dit geval vooral ter illustratie. Ook dat kan uiteraard een volgende keer anders zijn. Bovendien levert de nadere analyse wel degelijk nuttige informatie op. Het valt op dat waar een alternatief als MVR bijna alleen maar voordelen heeft, er aan bijvoorbeeld biomassa nog best een aantal aandachtspunten kleeft, zoals milieueffecten en beschikbaarheid.

Dat laatste speelt ook een rol bij andere alternatieven die in dit rapport de revue zijn gepasseerd, zoals groen gas en waterstof. Het is daarbij van belang om in gedachten te houden dat het hier niet alleen om beschikbaarheid an sich gaat, maar vooral om beschikbaarheid voor *deze toepassing*. Biomassa, groen gas en waterstof worden door veel sectoren geclaimd, en er is cascadering nodig om te bepalen wat er beschikbaar is voor de industrie.

Ondanks dat de meeste alternatieven nog niet in de buurt zitten van de kosteneffectiviteit van CCS, kunnen we op grond van onze procesbenadering wel een blik in de toekomst werpen: welke duurzame technologieën zitten eraan te komen? Met name voor de productie van stoom is er een aantal veelbelovende kandidaten. Door nader onderzoek te doen naar de kosten van bijvoorbeeld de HT-warmtepomp en de boiler op houtsnippers wordt het potentieel van deze alternatieven helderder. Met de huidige zeefcriteria komt de e-boiler naar verwachting vanaf 2028 als mogelijk kosteneffectief alternatief uit de zeefstudie, dit hangt met name af van de emissiefactor van het elektriciteitsnet. Daarnaast is het belangrijk om niet-algemeen-toepasbare alternatieven onder de aandacht te brengen wanneer ze wél een optie zijn, zoals het gebruik van reststoom, maar ook de inpassing van warmtepompen in het proces.

In deze studie hebben we (in overleg met het ministerie van EZK) een aantal categorieën uitgesloten van de zeef, waaronder biogene emissies. Op dit moment tellen negatieve emissies nog niet mee onder het EU ETS, waardoor de prikkel voor CCS met biogene emissies beperkt is. Op Europees en landelijk niveau is er wel discussie gaande over hoe dit het beste ingevuld kan worden. Vanuit klimaat oogpunt is het realiseren van negatieve emissies juist op de langere termijn essentieel, wat het blijvende belang van de techniek van afvang en opslag van CO₂ onderstreept.

Referenties

- Bantle, M., 2022. *Heat Pumping Technologies*, <https://heatpumpingtechnologies.org/wp-content/uploads/2022/05/04-michael-bantle-electrification-by-high-temperature-heat-pumps.pdf>.
- Bianchi, R., 2019. Omwonenden eisen onafhankelijk onderzoek uitstoot toekomstige biomassacentrale in Diemen. In: *NH Nieuws*, 19 maart 2019.
- Blommensteijn, W., 2022. *Uitspraak Raad van State Porthos: betekenis en hoe nu verder?*, Berghauser Pont Mediagroep, <https://www.omgevingsweb.nl/nieuws/uitspraak-raad-van-state-porthos-betekenis-en-hoe-nu-verder/>.
- 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.
- CE Delft, 2018. *Screening LCA for CCU routes connected to CO2 Smart Grid*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2020. *Kosteneffectieve alternatieven voor CCS. Een analyse van de mogelijke rol van CCS in vier industriële sectoren.*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2022. *Herziening zeefmethodiek CCS voor SDE++*, Delft: Niet gepubliceerd.
- CE Delft, De Gemeeynt & Margriet Kuijper Consultancy, 2018. *Routekaart CCS*, Delft: CE Delft.
- CE Delft & Royal HaskoningDHV, 2020. *Bio-Scope : Toepassingen en beschikbaarheid van duurzame biomassa*, Delft: CE Delft.
- Chemelot, 2021. *RWE en John Cockerill bouwen proefinstallatie voor waterstofproject FUREC*, <https://www.chemelot.nl/nieuws/rwe-en-john-cockerill-bouwen-proefinstallatie-voor-waterstofproject-furec>.
- CO2 Value Europe, lopend. *CCU Projects Database*, <https://database.co2value.eu/>.
- CO2GeoNet, 2021. *State-of-play on CO2 geological storage in 32 European countries - an update*.
- Collodi, G., Azzaro, G., Ferrari, N. & Santos, S., 2017. Techno-economic Evaluation of Deploying CCS in SMR Based Merchant H2 Production with NG as Feedstock and Fuel. *Energy Procedia*, 114, 2690-2712.
- EBN & Gasunie, 2018. *Transport en opslag van CO₂ in Nederland : Verkennende studie*, Utrecht ; Groningen: EBN/Gasunie.
- EC, 2021. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, COM/2021/557 final*, European Commission (EC), https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb7eb9c-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.
- Euractiv, 2022. *LEAK: Long-awaited EU rules on renewable hydrogen expected 15 Dec*, <https://www.euractiv.com/section/energy/news/leak-long-awaited-eu-rules-on-renewable-hydrogen-expected-15-dec/>.
- Garrett, D. E., 1989. *Chemical Engineering Economics*, Dordrecht, Springer.
- Gasunie, 2023 *Q&A's waterstof backbone* [Online] <https://www.gasunie.nl/qas-waterstof-backbone>.
- General Electric, 2021. *Steam Turbine Replacement*, Villebon-sur-Yvette, France: General Electric.
- IEA Bioenergy, 2018. *Hydrogen from biomass gasification*, Paris, France: International Energy Agency.



- JRC, 2017. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- 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>.
- Lepage, T., Kammoun, M., Schmetz, Q. & Richel, A., 2021. Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment. *Biomass and bioenergy*, 144, 105920.
- Natuur & Milieu, 2020. *Biomassavisie Update 2020. De rol van biomassa in een duurzame economie*, Utrecht: Natuur & Milieu.
- Navigant, 2019. *Technische alternatieven voor CCS in Nederland. Overwegingen bij en data voor de 'zeef' voor CCS aanvragen binnen de verbreding van de SDE+*, Utrecht: Navigant.
- Nobian, 2022. *Nobian tekent intentieverklaring maatwerk met kabinet om nul CO2-uitstoot met tien jaar te versnellen naar 2030*, <https://www.nobian.com/nl/zout-en-chemiebedrijf-nobian-tekent-intentieverklaring-maatwerk-met-kabinet-om-nul-co2-uitstoot-met-tien-jaar-te-versnellen-naar-2030>.
- NRC, 2022. *Aluminiumfabriek Aldel failliet vanwege hoge energieprijzen*, <https://www.nrc.nl/nieuws/2022/10/27/aluminiumfabriek-aldel-failliet-vanwege-hoge-energieprijzen-a4146523>.
- PBL, 2019. *Decarbonisation options for the Dutch aluminium industry*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2022a. *Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2022b. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- Rijksoverheid, 2019. *Klimaatpakket*, Den Haag: Rijksoverheid.
- RVO, lopend. *Subsidies & Financiering : Stimuleren Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++)*, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde> 2022.
- RWE, 2022. *Project FUREC is geselecteerd voor subsidie vanuit het EU Innovation Fund*, <https://benelux.rwe.com/pers/2022-07-13-furec-ontvangt-subsidie-eu-innovatie-fonds>.
- SER, 2020. *Biomassa in balans : Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen*, Sociaal-Economische Raad (SER), <https://www.ser.nl/-/media/ser/downloads/adviezen/2020/biomassa-in-balans.pdf>.
- Topsoe, 2021. *Topsoe puts demonstration plant into operation for production of sustainable methanol from biogas - significant global carbon reduction potential.*, Topsoe A/S, <https://blog.topsoe.com/topsoe-puts-a-demonstration-plant-into-operation-for-production-of-sustainable-methanol-from-biogas-significant-global-carbon-emission-reduction-potential>.
- VVD, D66, CDA & ChristenUnie, 2021. *Coalitieakkoord 'Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst'*, Den Haag: Rijksoverheid.
- Zhang, C., 2022. Review of catalytic reforming of biomass pyrolysis oil for hydrogen production. *Frontiers in Chemistry*.
- Zühlsdorf, B., Poulsen, J. L. & Schlosser, F., 2022. *IEA HPT Annex 58 about HTHPs - State of the art review, demonstration cases and development perspectives*. 3rd High-Temperature Heat Pump Symposium 2022, 2022 Copenhagen.



A Sectoren en bedrijven

>100 kton/j CO₂-uitstoot

Tabel 6 - Bedrijven met een CO₂-uitstoot van meer dan 100 kton per jaar

Sector	Bedrijven	Uitstoot (ton CO ₂ /j)
Aardolieraffinage	Shell Nederland Raffinaderij BV	4.377.788
	Esso Nederland BV (Raffinaderij Rotterdam)	2.752.854
	BP Rotterdam Refinery	2.151.299
	Zeeland Refinery N.V.	1.588.718
	Gunvor Petroleum Europoort B.V.	409.776
	VPR Energy B.V.	107.804
Behandeling van onschadelijk afval	AVR NV (Rijnmond)	1.722.600
	Afval Energie Bedrijf (Amsterdam)	1.082.233
	HVC (Alkmaar)	1.033.391
	Attero BV (Moerdijk)	997.706
	Twence BV Boeldershoek	916.641
	EEW Energy from Waste Delfzijl B.V.	626.259
	AVR Afvalverwerking BV (Duiven)	564.499
	ARN B.V.	320.042
	HVC Afvalcentrale Dordrecht	314.300
	Reststoffen Energie Centrale (REC)	235.664
	Slibverwerking Noord-Brabant	148.061
	DRSH Zuiveringsslib N.V.	124.507
Behandeling van schadelijk afval	Afvalstoffen Terminal Moerdijk BV (ATM)	198.916
Beheer en exploitatie van transportnetten voor elektriciteit, aardgas en warm water	Enecogen VOF	1.995.379
	Eneco (Lage Weide)	411.772
	Eneco Bio Golden Raand	401.099
	Eneco Warmteproductie Utrecht B.V.	303.402
Gesorteerd materiaal voorbereiden tot recycling	BECC B.V.	174.183
Groothandel in vloeibare en gasvormige brandstoffen	Alco Energy Rotterdam	347.863
Inzameling van onschadelijk afval	SUEZ ReEnergy Roosendaal	393.425
Overige gespecialiseerde reiniging	Emmtec Services BV	139.082
Productie en distributie van stoom en gekoelde lucht	Enecal Energy VOF	182.111
Productie van elektriciteit door thermische, kern- en warmtekrachtcentrales	RWE Eemshaven Holding BV	5.473.018
	Nuon Power Generation BV (Velsen)	3.875.962
	Nuon Power Generation BV (Hemweg)	3.203.912
	RWE Generation NL B.V.	3.010.857
	Uniper Centrale Maasvlakte	2.907.639
	Nuon Power Projects 1 BV (Eemshaven)	2.563.475
	Centrale Rotterdam	2.248.115
	ENGIE Energie Nederland N.V. (Eemscentrale)	2.111.696
	Maxima-centrale	1.842.058
	Nuon Power IJmond 1	1.751.362

Sector	Bedrijven	Uitstoot (ton CO ₂ /j)
	Sloe Centrale BV (Vlissingen)	1.725.101
	Nuon Power Generation BV (Diemen)	1.287.229
	Air Liquide Pergen VOF	1.238.037
	Maasstream Energie CV	977.731
	Uniper Centrale RoCa	345.317
	Eurogen CV	207.357
	E.on Locatie Leiden	164.802
	E.On Generations Den Haag	140.348
Productie van elektriciteit door windenergie	Rijnmond Energie	1.258.680
Productie van elektriciteit door zonnecellen, warmtepompen en waterkracht	Biomassacentrale Moerdijk	351.387
Vervaardiging van aluminium	Klesch Aluminium Delfzijl	132.205
Vervaardiging van grafisch papier en karton	Parencó B.V.	242.563
	Sappi Maastricht BV	162.306
	Crown van Gelder N.V.	126.099
Vervaardiging van ijzer en staal en van ferrolegeringen	Tata Steel IJmuiden BV	6.348.970
Vervaardiging van industriële gassen	Air Liquide Nederland BV	784.542
	Air Products Nederland BV (Pernis)	767.397
	Air Products Nederland BV (Botlek)	107.289
Vervaardiging van kunstmeststoffen en stikstofverbindingen	YARA Sluiskil BV	2.214.925
Vervaardiging van kunststof in primaire vorm	Chemelot Site Permit BV	3.275.978
	SABIC Innovative Plastics BV	226.687
	Indorama Ventures Europe BV	138.130
	Botlek VCM Plant	101.498
Vervaardiging van niet-metaalhoudende minerale producten (geen schuur-, slijp- en polijstmiddelen)	Rockwool B.V.	133.138
Vervaardiging van overige anorganische basischemicaliën	Delesto BV	318.623
	Akzo Nobel Chemicals BV (Hengelo)	262.408
	Cabot BV	158.881
	ESD-SIC BV	119.436
	Akzo Nobel Chemicals BV (Botlek)	100.708
Vervaardiging van papier en karton voor verpakking	DS Smith Paper De Hoop Mill	176.738
	Smurfit Kappa Roermond Papier BV	165.413
Vervaardiging van petrochemische producten	Dow Benelux BV (Hoek)	3.925.661
	Shell Nederland Chemie BV (Moerdijk)	2.238.363
	Lyondell Chemie Nederland BV	269.432
	Bio Methanol Chemie Nederland (BioMCN)	227.134
Vervaardiging van plantaardige en dierlijke oliën en vetten (geen margarine en andere spijsvetten)	Archer Daniels Midland Europoort BV (ADM)	146.570
Vervaardiging van suiker	Suiker Unie Vierverlaten	139.193
	Suiker Unie (Dinteloord)	120.029
Vervaardiging van zetmeel en zetmeelproducten	Cargill Benelux BV	227.071



B Uitgesloten sectoren in meer detail

In deze bijlage presenteren we kort welke sectoren en bedrijven zijn uitgesloten op basis van welke criteria. Per criterium vermelden we kort waarom dit leidt tot uitsluiting van de zeef, de volledige details zijn in het methoderapport te vinden. Daarnaast willen we nog benadrukken dat uitsluiting van een sector ertoe leidt dat een subsidieaanvraag voor CCS niet geweigerd zal worden vanuit de zeef.

B.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. De procesemissies van Suiker Unie Dinteloord zijn maar een klein gedeelte van de totale emissies en gelden niet voor de overige bedrijven in de suikerindustrie. Daarom wordt de suikersector niet uitgesloten.

Vermijdbare procesemissies

Er zijn meer productieprocessen waarbij CO₂ vrijkomt als procesemissie. Dit betreft echter emissies die voortkomen uit het gebruik van fossiele brandstoffen en/of grondstoffen. Deze emissies zijn te vermijden door het gebruik van hernieuwbare brandstoffen/grondstoffen en zijn dus niet onvermijdelijk. Het gaat om de volgende processen en bedrijven:

- productie van actief kool (Cabot BV);
- productie van aluminium (Klesch Aluminium Delfzijl);
- productie van ammoniak (Yara Sluiskil BV, OCI BV (Chemelot Site Permit));
- productie van ethyleenoxide (Dow Benelux BV, Shell Nederland Chemie BV);
- productie van siliciumcarbide (ESD-SIC BV);
- productie van waterstof (Air Liquide Nederland BV, Air Products Nederland BV, Esso Nederland BV, Shell Nederland Raffinaderij BV, Zeeland Refinery NV);
- katalytisch kraken van olieproducten (BP Rotterdam Refinery, Shell Nederland Raffinaderij BV).

B.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 sectoren worden uitgesloten van de zeef:

- gesorteerd materiaal voorbereiden tot recycling;
- productie van elektriciteit door zonnecellen, warmtepompen en waterkracht.

In deze sectoren zijn uitsluitend bedrijven actief die alleen biogene CO₂ uitstoten.

B.3 Elektriciteitsopwekking

Voor elektriciteitsopwekking zijn er momenteel geen concrete projecten voor CCS bekend. 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;
- overige gespecialiseerde reiniging;
- productie en distributie van stoom en gekoelde lucht;
- productie van elektriciteit door thermische, kern- en warmtekrachtcentrales;
- productie van elektriciteit door windenergie.

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.

B.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. Daarmee wordt de CCS-route voorlopig niet verder onderzocht.

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

B.5 Afvalverbranding en overige verwerking van 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.

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

B.6 Overige uitgesloten sectoren

Aluminium

De sector 'Vervaardiging van aluminium' wordt uitgesloten omdat het enige bedrijf in de sector (Klesch Aluminium Delfzijl/'Aldel') onlangs failliet is gegaan (NRC, 2022). Daarnaast zijn er geen plannen bekend voor CO₂-afvang bij Aldel en lijkt dat ook niet waarschijnlijk aangezien de CO₂-concentratie in de restgassen met 0,6% te laag is om economisch CCS op toe te passen (PBL, 2019).

C Longlist met alternatieven

C.1 Productie van laagtemperatuurstoom (<200 °C)

Stoom van minder dan 200 °C wordt nu voornamelijk geproduceerd met een aardgas-gestookte boiler of wkk. We kiezen als fossiele referentietechniek voor de aardgasgestookte boiler omdat de wkk ook elektriciteit produceert en we elektriciteitsproductie eerder hebben uitgesloten van de zeefstudie. Voor warmte onder de 200 °C zijn ook andere technieken mogelijk die efficiënter warmte produceren, bijvoorbeeld door middel van warmtepompen.

In Tabel 7 is een overzicht gegeven van de overwogen alternatieven en of zij op de shortlist komen.

Tabel 7 - Alternatieven voor de productie van laagtemperatuurstoom (<200 °C)

Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
0. CCS	Aardgasboiler met post-combustion CCS, gasvormig transport	-	-	Ja
1. Energie-efficiëntie	Diverse maatregelen	1-5%	Ja	Nee
2. Elektrificatie	Elektrische boiler	54%	Ja	Nee
	Hogetemperatuurwarmtepomp	~80%	Ja	Ja
3. Waterstof	Waterstofboiler	100%	Ja	Ja
4. Biomassa	Boiler vaste biomassa	100%	Ja	Ja
	Boiler groen gas	100%	Ja	Ja
5. Overige hernieuwbare warmte	Zonthermie	12-100%	Nee	Nee
	Ultradiepe geothermie	100%	Nee	Nee
	Restwarmtestoom	~80%	Ja	Ja
6. Combinaties	-	-	-	-

C.1.1 Aardgasboiler met post-combustion CCS, gasvormig transport

De aardgasboiler is de fossiele referentietechniek. De CO₂ wordt in de schoorsteen afgevangen met een aminescrubber, gecompriemd en gasvormig afgevoerd per pijpleiding.

C.1.2 Energie-efficiëntie

In stoomsystemen zijn vele verbeteringen mogelijk op het gebied van energie-efficiëntie, bijvoorbeeld het voorverwarmen van voedingswater, verbrandingslucht en brandstof; plaatsen van condenserende warmtewisselaar in de schoorsteen; terugwinning van warmte uit spuiwater, het verbeteren van de isolatie en het terugdringen van verliezen in het condensaatstelsel (JRC, 2017).

Deze maatregelen resulteren per stuk typisch in een besparing van enkele procenten. Het criterium van minimaal 80% CO₂-besparing wordt daarmee niet gehaald.

Daarnaast is evaluatie van de maatregelen lastig omdat het per installatie sterk verschilt welke maatregelen al getroffen zijn. We kiezen ervoor om deze maatregelen niet verder mee te nemen.

C.1.3 Elektrische boiler

De elektrische boiler zet elektriciteit om in warmte met een rendement van nagenoeg 100%. De e-boiler is vooral een duurzaam alternatief voor de productie van stoom, ook bij hogere temperatuur en druk. Elektrische boilers zijn marktgereed en worden al succesvol gebouwd op industriële schaal via de SDE++. De elektrische boiler resulteert alleen in CO₂-reductie als de gebruikte elektriciteit schoon genoeg is. PBL heeft voor 2022 vastgesteld dat de elektrische boiler over de subsidieperiode van de SDE++ 4.300 uur per jaar mag draaien (PBL, 2022a), omdat er over de subsidieperiode gemiddeld 4.300 uur per jaar voldoende hernieuwbare elektriciteit beschikbaar is. De maximale CO₂-reductie is daarmee beperkt tot $4.300/8.000 = 54\%$ in het geval van volledig duurzame stroom op die uren. Daarmee komt de elektrische boiler niet in aanmerking voor de shortlist.

Om in te schatten vanaf wanneer de elektriciteitsmix wél duurzaam genoeg zou zijn gebruiken we de integrale emissiefactor voor elektriciteit zoals deze is vermeld in tabel 23b van de tabellenbijlage van de KEV 2022. Vanaf 2040 hebben we de emissies van elektriciteitsproductie op nul gezet. In dat jaar worden er geen emissierechten meer geveild binnen het ETS-systeem volgens de voorgenomen wijzigingen in het ETS in het kader van Fit-for-55.

We kijken wat gemiddeld de emissies zijn voor de gasboiler en de elektrische boiler over een looptijd van 15 jaar. Voor de gasboiler gaan we uit van een rendement van 90% LHV, voor de elektrische boiler van 99%, conform de SDE++. Dit is weergegeven in Tabel 8.

De elektrische boiler resulteert vanaf 2028 in tenminste 80% lagere emissies dan de gasboiler bij basislast bedrijf.

Tabel 8 - Gemiddelde emissiefactoren voor gas- en e-boilers over een looptijd van 15 jaar bij realisatie in een gegeven jaar

Parameter	Eenheid	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Emissies gasboiler	kg CO ₂ /kWh _{th}	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226
Emissies e-boiler	kg CO ₂ /kWh _{th}	0,117	0,102	0,087	0,074	0,061	0,050	0,040	0,032	0,026
Emissiereductie t.o.v. gas	%	48%	55%	61%	67%	73%	78%	82%	86%	89%

Met de kosten voor gas, CO₂ en elektriciteit zoals vermeld in de KEV 2022 zijn de marginale kosten voor gasboilers en e-boilers in dat jaar vrijwel gelijk, zie Tabel 9. De onrendabele top zal naar verwachting dus beperkt zijn. Met de huidige zeefcriteria zal, naar verwachting, de e-boiler dus vanaf 2028 als mogelijk kosteneffectief alternatief voor CCS uit de zeefstudie naar voren komen.

Tabel 9 - Marginale kosten van gas- en e-boilers over een looptijd van 15 jaar bij realisatie in een gegeven jaar

Parameter	Eenheid	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Gasboiler	€/MWh _{th}	€ 72	€ 74	€ 76	€ 77	€ 78	€ 79	€ 80	€ 81	€ 82
Elektrische boiler basislast	€/MWh _{th}	€ 85	€ 84	€ 83	€ 82	€ 82	€ 81	€ 82	€ 82	€ 83
Emissiereductie t.o.v. gas	%	117%	113%	109%	107%	105%	104%	103%	102%	101%

C.1.4 Hogetemperatuurwarmtepomp

Een hogetemperatuurwarmtepomp kan warmte maken op meer dan 100 °C. Het geëvalueerde type kan direct stoom produceren. Daarvoor is restwarmte nodig met een temperatuur van 70-120 °C (Bantle, 2022). Met een COP van 3 komt de emissiereductie op 80%. Er zijn meerdere volwassen technologieën met TRL >7 die een COP van minstens 3 halen (Zühlsdorf et al., 2022), waarmee aan de eisen voor emissiereductie en technische gereedheid wordt voldaan.

C.1.5 Waterstofboiler

Stoomboilers op waterstof werken op dezelfde manier als aardgasgestookte boilers, al zijn er kleine veranderingen nodig om de boiler geschikt te maken voor waterstof. De verbranding van waterstof in boilers en fornuizen is volwassen en bewezen technologie (TRL 8) die echter nog weinig wordt toegepast en maatwerk vereist. Verbranding van waterstof resulteert in 100% emissiereductie als de waterstof klimaatneutraal geproduceerd wordt.

SDE niet in strijd met additionaliteitseisen voor waterstof

De Europese Unie bereidt een Delegated Act (DA) voor over de eisen waaraan elektriciteit gebruikt voor de productie van waterstof aan moet voldoen, zodat deze waterstof als duurzaam bestempeld kan worden. De DA is nog niet afgerond, maar bestaat op hoofdlijnen uit de volgende drie eisen (Euractiv, 2022):

- **Additionaliteit:** de elektriciteit moet uit nieuwe hernieuwbare bronnen komen, niet uit reeds bestaande. Dit wordt gewaarborgd doordat de opwekinstallatie niet langer dan 36 maanden in bedrijf mag zijn als de elektrolyser in bedrijf gesteld wordt.
- **Correlatie in tijd:** de elektriciteit moet op hetzelfde moment worden gebruikt als dat deze wordt opgewekt. Dit wordt gewaarborgd doordat de elektriciteit in hetzelfde uur gebruikt moet worden na 1 april 2028. Tot die tijd mag dit hetzelfde kwartaal zijn, bij wijze van uitzondering.
- **Correlatie in plaats:** de elektriciteit moet op dezelfde plaats worden gebruikt als dat deze wordt opgewekt. Dit wordt gewaarborgd doordat opwek en elektrolyser in dezelfde biedzone moeten staan. Nederland is één biedzone.

Deze voorwaarden komen niet heel zichtbaar terug in de SDE++, maar zitten er wel degelijk in verwerkt. De SDE++ heeft categorieën voor de productie van groene waterstof met een directe lijn en met netafname.

- **Additionaliteit** wordt bij de directe lijn gewaarborgd doordat elk elektrolyseproject ook zijn eigen productiemiddelen moet realiseren. Bij netafname geldt een jaarlijks maximaal aantal uren waarop de elektrolyzer ingezet mag worden, gebaseerd op de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit in Nederland. Hiermee wordt voorkomen dat er hernieuwbare elektriciteit uit bestaande opwek wordt ingezet voor elektrolyse in plaats van verduurzaming van de elektriciteitsmix.
- **Correlatie in tijd** wordt bij de directe lijn gewaarborgd doordat er alleen elektriciteit uit de eigen opwek gebruikt mag worden voor elektrolyse. Het maximum subsidiabele uren voor netafname zorgt ervoor dat de elektrolyzer wordt ingeschakeld op de goedkoopste uren, dat zijn ook de uren dat er de meeste hernieuwbare elektriciteit is. Zo wordt ook voor netafname aan de correlatie in tijd voldaan.
- **Correlatie in plaats** wordt gewaarborgd doordat de SDE++ alleen toegankelijk is voor projecten op Nederlands grondgebied.

Productie van groene waterstof binnen de SDE++ is dus niet strijdig met de aanstaande Europese additionaliteitseisen.

Infrastructuur voor waterstof is net zo snel gerealiseerd als infrastructuur voor CO₂

Er ligt in Nederland nog geen openbaar toegankelijk en landelijk dekkend waterstofnet. Gasunie werkt aan de aanleg van een landelijk hoofdnetwerk, de 'waterstof backbone'. Gasunie geeft aan dat dit netwerk in 2026 gereed moet zijn, in 2030 zijn ook de verbindingen met het buitenland en met een waterstofopslag gereed (Gasunie, 2023). Zeer grote gebruikers kunnen direct op de backbone worden aangesloten, kleinere gebruikers kunnen via een privaat te ontwikkelen regionaal netwerk worden aangesloten. Hoewel het niet zeker is dat iedere gebruiker binnen zes jaar kan worden aangesloten, is dat voor CO₂-leidingen ook niet altijd zeker. De doorlooptijd voor waterstofinfra is vergelijkbaar met die van infrastructuur voor CO₂, daarom nemen we waterstof gewoon mee als optie.

C.1.6 Boiler op vaste biomassa

Stoomboilers kunnen gebruik maken van vaste biomassa als brandstof, bijvoorbeeld houtsnippers, snoei- en dunningshout, houtpellets of B-hout. De verbranding van vaste biomassa is bewezen technologie die op grote schaal beschikbaar is (TRL 9). Duurzaam geteelde biomassa heeft een CO₂-emissiefactor van 0 in het EU ETS, waarmee de emissiereductie op 100% komt.

C.1.7 Boiler op groen gas

Groen gas is chemisch vrijwel identiek aan aardgas en kan dan ook zonder aanpassingen gebruikt worden in bestaande installaties. Aangezien er geen aanpassingen nodig zijn, is de TRL 9. Groen gas heeft een CO₂-emissiefactor van 0 in het EU ETS, waarmee de emissiereductie op 100% komt.

C.1.8 Zonthermie

Zonthermie oogst warmte van de zon met zonnecollectoren. Er kan warmte geproduceerd worden tot meer dan 500 °C. De warmte is echter alleen beschikbaar als de zon schijnt, ca. 1.000 uur per jaar. Dit past niet bij de continue warmtevraag in de industrie.

Dit probleem kan op twee manieren opgelost worden:

1. Door de warmtevraag op de overige uren met een andere bron in te vullen. Of
2. Door het systeem te overdimensioneren en een hogetemperatuurseizoensopslag toe te voegen.

Bij oplossing 1 komt het grootste gedeelte van de warmte uit het back-upsysteem. Dit systeem kan fossiel zijn of hernieuwbaar. Bij een fossiel back-upsysteem wordt de eis van 80% CO₂-reductie niet gehaald, bij een hernieuwbaar back-upsysteem is het logischer om het back-upsysteem zelf te evalueren in plaats van zonthermie. Oplossing 2 is niet haalbaar omdat er nog geen hogetemperatuurseizoensopslag beschikbaar is van voldoende TRL-niveau. Zonthermie komt dus niet op de shortlist.

C.1.9 Ultradiepe geothermie

Ultradiepe geothermie gebruikt boringen van meerdere kilometers diep om aardwarmte van meer dan 100 °C naar de oppervlakte te brengen. Ultradiepe geothermie zou een emissiereductie van vrijwel 100% kunnen bereiken, er is enkel nog wat elektriciteit nodig voor de pompen. De technologie is echter nog nergens op grote schaal bewezen en zal dus niet binnen zes jaar rijp genoeg zijn om standaard op grote schaal uitgerold te worden.

C.1.10 Restwarmtestoom

Restwarmte in de vorm van stoom <200 °C is soms beschikbaar vanuit nabij gelegen industrie of afvalverbrandingsinstallaties. Deze stoom zou anders gebruikt worden om elektriciteit te produceren met een stoomturbine. De lagedrukstoom aan de uitlaat van de turbine moet gecondenseerd worden, waarbij veel warmte verloren gaat. Het is energetisch efficiënter om de stoom te gebruiken als restwarmte, waarbij vrijwel de gehele warmte-inhoud benut wordt. Gezien het relatief lage opwekkingsrendement van afvalverbrandingsinstallaties (~30%) en de lage emissiefactor van elektriciteit over de looptijd is een emissiereductie van 80% haalbaar. De technologie van stoomnetten is volwassen en kan ruim binnen zes jaar gerealiseerd worden.

C.2 Productie van MT/HT-stoom

De productie van midden- en hogetemperatuurstoom betreft de productie van stoom van meer dan 200 °C. De fossiele referentietechniek is wederom de aardgasgestookte stoomketel. De efficiënte technieken die beschikbaar zijn voor de productie van lagetemperatuurstoom, zijn over het algemeen niet toepasbaar bij hogere temperaturen. De resterende technieken zijn al besproken bij de productie van LT-stoom in Paragraaf C.1.

In Tabel 10 is een overzicht gegeven van de overwogen alternatieven en of zij op de shortlist komen.

Tabel 10 - Alternatieven voor de productie van midden- en hogetemperatuurstoom (>200 °C)

Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
0. CCS	Aardgasboiler met post-combustion CCS, gasvormig transport	-	-	Ja
1. Energie-efficiëntie	Diverse maatregelen	Nee, zie Paragraaf C.1		
2. Elektrificatie	Elektrische boiler	Nee, zie Paragraaf C.1		
3. Waterstof	Waterstofboiler	Ja, zie Paragraaf C.1		
4. Biomassa	Boiler vaste biomassa	Ja, zie Paragraaf C.1		
	Boiler groen gas	Ja, zie Paragraaf C.1		
5. Overige hernieuwbare warmte	-	-	-	-
6. Combinaties	-	-	-	-

C.3 Productie van MT/HT directe warmte

Bij directe warmte wordt de warmte vanuit de warmtebron direct overgedragen naar het medium dat verwarmd moet worden, zonder tussenliggend medium. Dit is anders dan bij stoom, dat als medium fungeert tussen warmtebron en het te verwarmen medium. Voorbeelden van installaties voor directe warmte zijn een keramiekoven of een procesfornuis.

We nemen een aardgasgestookt procesfornuis als fossiele referentietechniek.

In Tabel 11 is een overzicht gegeven van de overwogen alternatieven en of zij op de shortlist komen.

Tabel 11 - Alternatieven voor de productie van midden- en hogetemperatuur directe warmte (>200 °C)

Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
0. CCS	Procesfornuis op aardgas met post-combustion CCS, gasvormig transport	-	-	Ja
1. Energie-efficiëntie	Diverse maatregelen	1-5%	Ja	Nee
2. Elektrificatie	Elektrisch procesfornuis	54%	Ja	Nee
3. Waterstof	Procesfornuis op waterstof	100%	Ja	Ja
4. Biomassa	Procesfornuis op vaste biomassa	100%	Ja	Ja
	Procesfornuis op groen gas	100%	Ja	Ja
5. Overige hernieuwbare warmte	-	-	-	-
6. Combinaties	-	-	-	-

C.3.1 Procesfornuis op aardgas met post-combustion CCS, gasvormig transport

Het aardgasgestookte procesfornuis is de fossiele referentietechniek. De CO₂ wordt in de schoorsteen afgevangen met een aminescrubber, gecomprimeerd en gasvormig afgevoerd.

C.3.2 Energie-efficiëntie

Bij het fornuis zijn er minder mogelijkheden om de energie-efficiëntie te verbeteren dan bij de boiler, omdat er geen stoomcyclus is. Er zijn echter genoeg mogelijkheden over, bijvoorbeeld het voorverwarmen van de brandstof en verbrandingslucht; reduceren van de lucht-overmaat en verbeteringen in isolatie en procesaansturing (JRC, 2017). Deze verbeteringen resulteren echter slechts in kleine emissiereducties, waarmee maatregelen voor energie-efficiëntie niet voldoen aan de eis voor minimaal 80% reductie.

C.3.3 Elektrisch procesfornuis

Het elektrische procesfornuis zet elektriciteit om in warmte met een rendement van nagenoeg 100%. Vaak bestaat het fornuis uit een shell and tube warmtewisselaar met een ingebouwd elektrisch element. De techniek is bekend en volwassen, maar wordt nog niet of nauwelijks op industriële schaal toegepast. Er zijn echter wel enkele bedrijven die modulaire installaties aanbieden die gemakkelijk opgeschaald kunnen worden tot een schaal van enkele tientallen megawatten, bijvoorbeeld Sigma Thermal en Chromalox.

Net als de elektrische boiler resulteert het elektrische procesfornuis ook alleen in CO₂-reductie als de gebruikte elektriciteit schoon genoeg is. We gaan voor het procesfornuis uit van dezelfde 4.300 uur per jaar, waarmee de maximale CO₂-reductie beperkt is tot 54%. Daarmee komt het elektrische procesfornuis niet op de shortlist.

C.3.4 Procesfornuis op waterstof

Net als boilers kunnen ook aardgasgestookte procesfornuizen eenvoudig worden omgebouwd naar waterstof. Voor fornuizen geldt dezelfde CO₂-reductie en technische gereedheid als voor boilers.

C.3.5 Procesfornuis op vaste biomassa

Het procesfornuis op vaste biomassa gebruikt vergelijkbare technieken als de boiler op vaste biomassa. Voor fornuizen geldt dezelfde CO₂-reductie en technische gereedheid als voor boilers.

C.3.6 Procesfornuis op groen gas

Het procesfornuis op groen gas gebruikt vergelijkbare technieken als de boiler op groen gas. Voor fornuizen geldt dezelfde CO₂-reductie en technische gereedheid als voor boilers.

C.4 Indampen van waterige oplossingen

Waterige oplossingen worden meestal ingedampt in een meertraps verdamper. Hierbij wordt stoom gebruikt om een oplossing in te dampen. Het water dat uit de oplossing verdampt in de vorm van stoom, wordt gebruikt om de vloeistof in een tweede verdamper in te dampen. Deze tweede verdamper werkt op een lagere druk en temperatuur. Commerciële verdampers hebben 5 tot 8 trappen.

We nemen de stoomvraag van het verdampingsproces als gegeven. De fossiele referentietechniek om de stoomvraag in te vullen is een aardgasgestookte stoomketel.

De technieken om lagetemperatuurstoom te produceren zijn al besproken in Paragraaf C.1. We beschouwen hier alleen één extra duurzaam alternatief.

In Tabel 12 is een overzicht gegeven van de overwogen alternatieven en of zij op de shortlist komen.

Tabel 12 - Alternatieven voor het indampen van waterige oplossingen

Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
0. CCS	Aardgasboiler met post-combustion CCS, gasvormig transport	-	-	Ja
1. Energie-efficiëntie	Diverse maatregelen	Nee, zie Paragraaf C.1		
2. Elektrificatie	Elektrische boiler	Nee, zie Paragraaf C.1		
	Mechanical vapour recompression (MVR)	92%	Ja	Ja
3. Waterstof	Waterstofboiler	Ja, zie Paragraaf C.1		
4. Biomassa	Boiler vaste biomassa	Ja, zie Paragraaf C.1		
	Boiler groen gas	Ja, zie Paragraaf C.1		
5. Overige hernieuwbare warmte	-	-	-	-
6. Combinaties	-	-	-	-

C.4.1 Mechanical vapour recompression (MVR)

Mechanische damp recompressie (MVR) is een warmtepomp die damp comprimeert tot een hogere druk en temperatuur. Een MVR wordt ook wel een openluswarmtepomp genoemd. MVR is een volwassen techniek die op industriële schaal verkrijgbaar is. Uitgaande van een COP van 7 (PBL, 2022a) bedraagt de CO₂-reductie 92%.

C.5 Compressie van gassen

Gassen worden gecomprimeerd met een compressor. De compressor kan worden aangedreven door diverse aandrijftechnieken. We nemen de tegendruk stoomturbine als fossiele referentietechniek. De stoom wordt geproduceerd met een aardgasgestookte boiler, waar post-combustion CCS op wordt toegepast met gasvormig transport.

De technieken om MT/HT-stoom te produceren zijn al besproken in Paragraaf C.2. In Tabel 13 is een overzicht gegeven van de overwogen alternatieven en of zij op de shortlist komen.

Tabel 13 - Alternatieven voor de compressie van gassen

Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
0. CCS	Aardgasboiler met backpressure stoomturbine, post-combustion CCS, gasvormig transport	-	-	Ja
1. Energie-efficiëntie	Diverse maatregelen	Nee, zie Paragraaf C.1		
2. Elektrificatie	Elektrische boiler	Nee, zie Paragraaf C.1		
	Elektromotor	51%	Ja	Nee
3. Waterstof	Waterstofboiler	Ja, zie Paragraaf C.1		
4. Biomassa	Boiler vaste biomassa	Ja, zie Paragraaf C.1		
	Boiler groen gas	Ja, zie Paragraaf C.1		
5. Overige hernieuwbare warmte	-	-	-	-
6. Combinaties	-	-	-	-

C.5.1 Elektromotor

De elektromotor is een directe vervanging van de tegendruk stoomturbine. De elektromotor heeft een rendement van zo'n 95%, vergeleken met 72% voor een 90% efficiënte stoomboiler en een 80% efficiënte stoomturbine (General Electric, 2021). Dit resulteert in een emissie-reductie van 51%, ruim beneden de drempel van 80%. De elektromotor is een volwassen techniek (TRL 9), die ook voor grote vermogens (10-100 MW) goed verkrijgbaar is.

C.6 Productie van waterstof

In Tabel 14 is een overzicht gegeven van de overwogen alternatieven en of zij op de shortlist komen.

Tabel 14 - Alternatieven voor de productie van waterstof uit aardgas

Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
0. CCS	Bestaande SMR, pre-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport	-	-	Ja
	Bestaande SMR, post-combustion CO ₂ -afvang, gasvormig transport	-	-	Ja
	Nieuwe SMR, post-combustion CO ₂ -afvang gasvormig transport	-	-	Ja
	Nieuwe ATR, pre-combustion CO ₂ -afvang	-	-	Ja
1. Energie-efficiëntie	-	-	-	-
2. Elektrificatie	e-SMR	40%	Nee	Nee
3. Waterstof	Groene waterstof	100%	Ja	Ja
4. Biomassa	SMR op groen gas	100%	Ja	Ja
	Pyrolyse van biomassa	100%	Nee	Nee

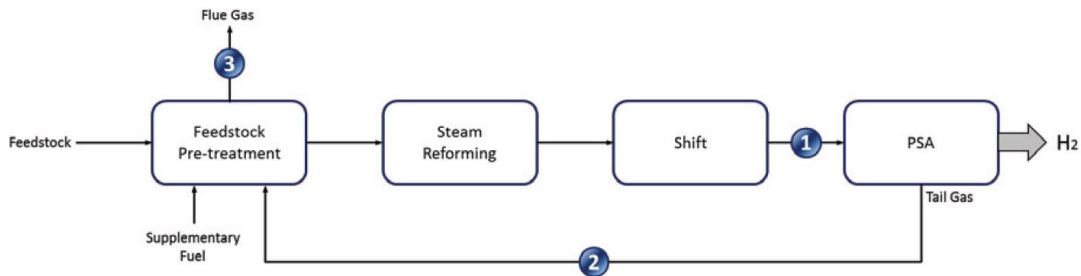


Richting	Alternatief?	CO ₂ -reductie	Implementatie binnen 6 jaar?	Shortlist?
	Vergassing van biomassa	100%	Nee	Nee
5. Overige hernieuwbare warmte	-	-	-	-
6. Combinaties	-			

De fossiele referentietechnieken zijn op basis van SMR en ATR.

Bij een SMR kan de CO₂ op verschillende plekken in het proces worden afgevangen, zie Figuur 7.

Figuur 7 - Blokdiagram van SMR met verschillende mogelijke locaties voor afvang



Bron: (Collodi et al., 2017).

C.6.1 Bestaande SMR, pre-combustion CO₂-afvang, gasvormig transport

Bij pre-combustion afvang in een SMR wordt de CO₂ afgevangen uit het shifted syngas (1 in Figuur 7), of het restgas van de PSA (2 in de figuur). We nemen deze optie mee omdat deze in de SDE++ zit. De CO₂-reductie van 80% die als eis geldt voor alternatieven, wordt echter niet gehaald met pre-combustion bij een bestaande SMR. De CO₂-reductie bedraagt typisch 50-55%. Zo'n 65% is mogelijk als de branders van de SMR worden gestookt op niet-gezuiverde waterstof (Collodi et al., 2017).

C.6.2 Bestaande SMR, post-combustion CO₂-afvang, gasvormig transport

Bij post-combustion afvang vindt de afvang op de schoorsteen van de SMR plaats, waar alle CO₂ samenkomt. Zowel de CO₂ uit het aardgas dat nodig is om het fornuis te stoken, als de CO₂ en niet-omgezette methaan vanuit het PSA restgas. Als 90% van de CO₂ wordt afgevangen, dan is de totale CO₂-reductie ook tegen de 90%.

C.6.3 Nieuwe SMR, post-combustion CO₂-afvang, gasvormig transport

Dit proces is hetzelfde als post-combustion afvang bij een bestaande SMR.

C.6.4 Nieuwe ATR, pre-combustion CO₂-afvang, gasvormig transport

De ATR heeft een reactor die zijn eigen warmte opwekt, vandaar de naam autothermal reformer. Omdat de reactor geen externe branders heeft, gaan de proces-CO₂ en de verbrandings-CO₂ door één leiding. Na de reactor is het gasmengsel op hoge druk, met een aanzienlijke CO₂ concentratie. Het is dus relatief eenvoudig en goedkoop om hier CO₂ af te

vangen met een hoog percentage afvang. De naam ‘pre-combustion’ is hier wellicht verwarrend omdat de afvang na de reactor plaatsvindt, maar is zo gekozen omdat het gaat om afvang van CO₂ in het proces en niet uit rookgas.

C.6.5 e-SMR

De warmte die nodig is om aardgas te reformen naar waterstof en CO₂ wordt bij een conventionele SMR geleverd door verbranding van aardgas en interne restgassen. Deze warmte kan echter ook geleverd worden door een elektrisch element. Een dergelijke installatie wordt een electrified reformer of ook wel e-SMR genoemd.

Zo'n 40% van de emissies van een conventionele SMR zijn afkomstig van de verbranding van aardgas voor proceswarmte, de overige 60% is afkomstig van de verbranding van restgassen en de CO₂ uit het reformingproces zelf (Collodi et al., 2017). Dat betekent dat de maximale emissiereductie van de e-SMR 40% is, bij volledig emissievrije elektriciteit. Dit is duidelijk beneden de drempel van 80%.

De technologie van de e-SMR is nog niet beschikbaar op grote schaal. Eind 2021 is er een eerste kleinschalige pilotfabriek gebouwd voor de productie van 10 m³ methanol per jaar (Topsoe, 2021).

C.6.6 Groene waterstof

Waterstof geproduceerd middels elektrolyse van water met hernieuwbare elektriciteit wordt groene waterstof genoemd. Bij gebruik van volledig hernieuwbare elektriciteit is de CO₂-reductie 100%. Elektrolyse is een volwassen techniek op TRL 9 en kan op korte termijn geïmplementeerd worden.

C.6.7 Reforming van groen gas

Reformers (SMR of ATR) gebruiken normaal gesproken aardgas voor de productie van waterstof. Dit aardgas kan zonder aanpassingen vervangen worden door groen gas van dezelfde kwaliteit. De CO₂-reductie is dan 100%. Aangezien er geen aanpassingen aan de installatie nodig zijn, kan de techniek op korte termijn worden geïmplementeerd.

C.6.8 Pyrolyse van biomassa

Waterstof kan geproduceerd worden door pyrolyse van biomassa en reforming van de pyrolyseolie. Vaste biomassa wordt in een zuurstofloze atmosfeer verhit, waardoor pyrolyseolie en een deel pyrolysegas ontstaat. De pyrolyseolie wordt gezuiverd en kan vervolgens gereformeerd worden tot waterstof. Alle koolstof in de biomassa wordt daarbij omgezet naar CO₂. Aangezien deze koolstof van biogene oorsprong is, bedraagt de CO₂-reductie 100%.

Pyrolyse is een techniek die nog in ontwikkeling is (TRL 7) (Lepage et al., 2021). Er is veel te vinden in de wetenschappelijke literatuur over de combinatie van biomassapyrolyse met reforming van de pyrolyseolie tot waterstof (Zhang, 2022), maar we hebben geen daadwerkelijke productie-installaties kunnen vinden voorbij de labschaal.

C.6.9 Vergassing van biomassa

Vaste biomassa kan vergast worden tot syngas, wat vervolgens omgezet kan worden in waterstof (IEA Bioenergy, 2018). Alle koolstof in de biomassa wordt daarbij omgezet naar CO₂. Aangezien deze koolstof van biogene oorsprong is, bedraagt de CO₂-reductie 100%.

De gebruikte technologieën hebben afzonderlijk een TRL boven de 7, maar zijn als combinatie nog nooit bewezen (IEA Bioenergy, 2018). RWE bouwt aan een proefinstallatie voor het FUREC-project, waarin huishoudelijk afval omgezet wordt naar waterstof (Chemelot, 2021). Dezelfde technologie kan ook werken voor biomassa. De proefinstallatie van FUREC is nog niet in operatie. Een investeringsbeslissing voor verdere opschaling is nog niet genomen (RWE, 2022). De techniek is daarmee nog (net) niet zo ver dat deze binnen zes jaar standaard beschikbaar is op industriële schaal, al zou dat volgend jaar wel zo kunnen zijn.

D Uitwerking technieken

D.1 Hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie

Hogetemperatuurwarmtepompen voor stoomproductie zijn nog beperkt beschikbaar in de markt. Daarom is er nog veel onzekerheid op de kosten. Om deze onzekerheid in beeld te brengen, hebben we de kosten voor deze techniek op twee manieren bepaald, en het gemiddelde genomen als eindresultaat. De eerste manier gaat uit van het gebruik van de Kobelco Steam Grow Heat Pump SGH 120. Deze warmtepomp is in principe beschikbaar in de markt, al hebben we niet éénduidig kunnen bevestigen of ze ook in Nederland op dit moment beschikbaar is. De tweede manier gaat uit van twee warmtepompen die nu in de SDE++ opgenomen zijn in serie: eerst de gesloten systeem warmtepomp en vervolgens de open systeem warmtepomp. We lichten de redenering voor elk van beide methodes hieronder toe, daarna volgt de tabel met de resulterende gemiddeld parameters.

Kobelco Steam Grow Heat Pump SGH 120

Voor de warmtepomp van KOBELCO hebben we informatie gebruikt uit de [productsheet van Kobelco](#). De SGH 120 warmtepomp heeft een TRL van 9. De output van de warmtepomp is stoom bij een temperatuur tussen 100 °C en 120 °C (bij 0,1 MPaG), waarbij de temperatuur van inkomend water tussen de 25 °C en 65 °C ligt. Bij een inkomende watertemperatuur van 65 °C en een uitgaande stoomtemperatuur van 120 °C is de COP 3,5. Het vermogen van één warmtepomp is 370 kW_{th}, waarbij er tot vijf warmtepompen tegelijk kunnen ingezet worden, wat het totaalvermogen op 1.850 kW_{th} brengt.

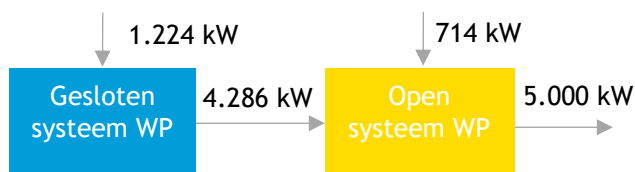
De investeringskosten voor dit type warmtepompen zijn gebaseerd op kostencurves van EDF en van University of Stuttgart uit het [overzicht van Viking Heat Engines](#). De kosten voor grotere warmtepompen (boven 1 MW_{th}) liggen op 350 €/kW_{th}. Deze kosten zijn inclusief planning en installatie, maar gelden alleen voor de warmtepomp zelf, niet voor de bredere aanpassingen van systemen. Daarom nemen we aan dat de totale projectkosten 2,6 keer de installatiekosten voor de warmtepomp zijn (Garrett, 1989). Dit brengt de installatiekosten op 910 €/kW_{th}. De vaste O&M-kosten zijn berekend als percentage (3,5%) van de investeringskosten. De variabele kosten zijn gebaseerd op de aangekomen elektriciteitsprijzen, uitgaande van een verbruik van 0,29 kWh/kWh (berekend op basis van de COP).

Twee warmtepompen uit SDE++ in serie

De tweede methode om stoom te produceren door middel van warmtepompen gaat uit van de aaneenschakeling van twee warmtepompen in serie: eerst de gesloten systeem warmtepomp, gevolgd door de open systeem warmtepomp. Figuur 8 geeft een schematisch beeld van de aangenomen situatie weer.

Alle parameters zijn berekend op basis van de gegevens uit de SDE++. Het samengesteld inputvermogen is 1.939 kW_{th} bij een outputvermogen van 5.000 kW_{th}, waarmee de COP op 2,6 uitkomt. De investeringskosten zijn 2.452 €/kW_{output}.

Figuur 8 - Schematische weergave aangenomen aaneenschakeling gesloten en open systeem warmtepomp



Parameters hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie

Voor de HT-warmtepomp nemen we het blad “*Gesloten systeem elektrisch gedreven warmtepomp (8.000 uur); COP <4 >=2.3*” van het OT-model als uitgangspunt. We bespreken hieronder enkel de parameters die afwijken.

De technische en investeringsparameters voor de hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie zijn berekend als een gemiddelde op basis van de twee aanpakken die hierboven beschreven zijn. De onderhoudskosten zijn gebaseerd op de geschaalde onderhoudskosten van de open- en gesloten lus warmtepomp uit de SDE. De overige parameters zijn overgenomen van de SDE+-warmtepompen. Voor de spreiding in de investeringskosten gaan we uit van TRL 8.

Tabel 15 - Parameters OT-model hogetemperatuurwarmtepomp voor stoomproductie

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Inputvermogen	329	kW _{th}	Berekend o.b.v. COP
Outputvermogen (thermisch of hernieuwbaar gas)	1.000	kW _{th}	Aanname
Investeringskosten output gebaseerd	1.681	€/kW _{output}	Gemiddelde van 2 aanpakken
Vaste O&M-kosten output gebaseerd	89,6	€/kW/jaar	Geschaalde kosten SDE open en gesloten WP
Relatief elektriciteitsgebruik	0,337	kWh/kWh	Gemiddelde van 2 aanpakken

D.2 Waterstofboiler

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

Tabel 16 - Parameters OT-model waterstofboiler

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	0,226	kg CO ₂ /kWh	
Rendement op vreemd vermogen	2,7%		Notitie uitgangspunten
Rendement op eigen vermogen	14,5%		Notitie uitgangspunten

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Aandeel eigen vermogen in investering	30%		Notitie uitgangspunten
Vennootschapsbelasting	25,0%		Notitie uitgangspunten
Economische levensduur	15	jaar	Notitie uitgangspunten
Termijn lening	15	jaar	Notitie uitgangspunten
Afschrijvingstermijn	15	jaar	Notitie uitgangspunten
Beleidsperiode	15	jaar	Notitie uitgangspunten

D.3 Boiler op vaste biomassa

Voor de boiler op vaste biomassa gaan we uit van de SDE-categorie ‘Ketel stoom uit houtpellets 5-50 MWth’. 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.

D.4 Toepassing van groen gas

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

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 ($\geq 95\%$ biogeen).
- Groengas uit biomassa (B-hout).
- Groengas uit afval.
- Levensduurverlenging Monomestvergisting kleinschalig, ombouw naar hernieuwbaar gas.
- Levensduurverlenging Monomestvergisting kleinschalig, hernieuwbaar gas.
- Levensduurverlenging Grootschalige allesvergisting, ombouw naar hernieuwbaar gas.
- Levensduurverlenging Grootschalige allesvergisting, Hernieuwbaar gas.
- Verbeterde slibgisting GG, hernieuwbaar gas.
- Monomestvergisting Grootschalig, hernieuwbaar gas.
- Monomestvergisting kleinschalig, hernieuwbaar gas.
- Grootschalige allesvergisting, Hernieuwbaar gas.

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

We hebben gekozen om de kosten voor de productie van groen gas door te rekenen en niet uit te gaan van de langetermijnprijs van gas. Groen gas is schaars en al het geproduceerde groen gas wordt vandaag al gebruikt. Het is dus nodig om extra groen gas 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 groen gas is hoger dan enkel het vervangen van aardgas, dit rekenen we door aan de inzet van het groen gas.

D.5 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, lopend)⁴.

D.6 Procesfornuis op waterstof

De kosten van het fornuis op waterstof zijn gebaseerd op de kosten voor een retrofit, zoals te vinden in de MIDDEN-database (TC0450 - Hydrogen thermal oil heater, retrofit).

Tabel 17 - Parameters OT-model fornuis op waterstof

Parameter	Waarde	Eenheid	Bron
Productie-eenheid	kWh		
Vermogenseenheid	kW		
Berekeningswijze correctiebedrag methode-ID	18		
Inputvermogen	1.124	kW _{th}	89% LHV-rendement (MIDDEN)
Outputvermogen (thermisch of hernieuwbaar gas)	1.000	kW _{th}	Aanname
Investeringskosten output gebaseerd	246	€/kW	MIDDEN
Vaste O&M-kosten output gebaseerd	8,16	€/kW/jaar	MIDDEN
Emissiefactor - Productie van warmte of overig	0,226	kg CO ₂ /kWh	
Rendement op vreemd vermogen	2,7%		Notitie uitgangspunten
Rendement op eigen vermogen	14,5%		Notitie uitgangspunten
Aandeel eigen vermogen in investering	30%		Notitie uitgangspunten
Vennootschapsbelasting	25,0%		Notitie uitgangspunten
Economische levensduur	15	jaar	Notitie uitgangspunten
Termijn lening	15	jaar	Notitie uitgangspunten
Afschrijvingstermijn	15	jaar	Notitie uitgangspunten
Beleidsperiode	15	jaar	Notitie uitgangspunten

D.7 Procesfornuis op vaste biomassa

De SDE++ bevat geen data voor procesfornuizen op biomassa. Ook de MIDDEN-database en de factsheets op www.energy.nl bevatten ook geen kostengegevens. Een zoektocht in de openbare literatuur leverde ook geen betrouwbare data op, dus deze categorie hebben we niet kunnen evalueren.

D.8 Mechanical vapour recompression (MVR)

Voor de MVR nemen we het blad 'Open systeem elektrisch gedreven warmtepomp (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.

⁴ De brochure vermeldt bij restwarmtebenutting: "Levering van stoom is hiervan uitgesloten, omdat dit geen onrendabele top heeft."

D.9 Productie van groene waterstof

Voor de productie van groene waterstof kent de SDE++ vier categorieën:

1. Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met windpark, 25% vermogensverhouding.
2. Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met zonnepark, 10% vermogensverhouding.
3. Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met wind- + zonnepark met cabelpooling, 50% vermogensverhouding.
4. Waterstofproductie via elektrolyse, netgekoppeld.

Alle technieken hebben een subsidie-intensiteit van ver boven de € 300 per ton CO₂, de bovengrens in de SDE++. We nemen de directe lijn met zon én wind mee (3^e techniek), deze heeft de laagste subsidie-intensiteit met 791 €/ton CO₂.

We nemen dus het blad “*Waterstofproductie via elektrolyse, directe lijn met wind- + zonnepark met cabelpooling, 50% vermogensverhouding*” 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.

D.10 CCS-technieken

Voor de CCS-technieken gebruiken we de sheets van het OT-model zoals weergegeven in Tabel 18.

Tabel 18 - Koppeling tussen CCS-technieken in zeefstudie en categorieën in OT-model

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

De variabele kosten voor CCS bestaan uit de verwerkingstoelage voor transport en opslag van CO₂, energiekosten en kosten voor het gebruik van chemicaliën (solvents) in het afvangproces. De kosten voor de solvents zijn bepaald aan de hand van het OT-model uit 2022, door de energiekosten en de verwerkingstoelage af te trekken van de totale O&M, zie Tabel 19.

Tabel 19 - Variabele O&M voor CCS-technieken

	Variabele O&M totaal (€/ton CO ₂)	Verwerkingstoelage (€/ton CO ₂)	Energiekosten (€/ton CO ₂)	Kosten voor solvent (€/ton CO ₂)
SMR, post (5A)	€ 72,50	€ 47,10	€ 22,41	€ 2,99
SMR, pre (3A)	€ 64,80	€ 47,10	€ 14,78	€ 2,91
ATR, pre (8A)	€ 61,70	€ 47,10	€ 14,10	€ 0,40

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

De verwerkingstoelage voor CO₂ bedroeg 47,10 €/ton in 2022, uitgaande van 8.000 uur per jaar. In 2023 hebben we de verwerkingstoelage op 71,80 €/ton gesteld, zodat de variabele O&M uitkomt op het bedrag in het OT-model.