RAPPORT

Inventarisatie kosteneffectiviteit CCS alternatieven

Onafhankelijk onderzoek 2022 naar aantoonbaar kosteneffectieve technische alternatieven voor CCS

Klant: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Referentie: BI3641IBRP001F01

Status: Definitief/01

Datum: 26 januari 2022

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX Amersfoort
Netherlands
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document:	Inventarisatie kosteneffectiviteit CCS alternatieven
Sub titel:	Onafhankelijk onderzoek 2022 naar aantoonbaar kosteneffectieve technische alternatieven voor CCS
Referentie:	BI3641IBRP001F01
Status:	01/Definitief
Datum:	26 januari 2022
Projectnaam:	Actualisatie Klimaatakkoord CCS 'Zeef' 2022
Projectnummer:	BI3641
Auteur(s):	Matthew Doe, Nienke Jorna, Klaas Koop
Opgesteld door:	Matthew Doe, Nienke Jorna, Klaas Koop
Gecontroleerd door:	Matthew Doe
Datum:	26-01-2022
Goedgekeurd door:	Klaas Koop
Datum:	26-01-2022

Classificatie
Open

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Samenvatting

Klimaatakkoord: CCS-subsidie mits het de ontwikkeling van andere technieken niet hindert
In het Klimaatakkoord van 2019 is afgesproken dat subsidiëring van de afvang en opslag van CO_2 (CCS) de ontwikkeling van andere technieken om de CO_2-emissie van de industrie terug te dringen niet in de weg mag staan. Om dit te borgen is subsidiering beperkt op basis van de relatieve kosteneffectiviteit ('zeef'), in het subsidiebudget ('plafond') en in de tijd ('horizon').

De zeef beoogt een balans te borgen tussen het voorkómen van verdringing van CO_2-arme technieken enerzijds en het benutten van het reductiepotentieel dat CCS biedt anderzijds. Indien voor een komend jaar vastgesteld wordt dat er geen ten minste even kosteneffectieve techniek is als CCS, kan gesubsidieerd worden tot het plafond (maximumaantal Mton) en/of de horizon (het jaar 2035) bereikt is.

Onafhankelijk onderzoek kosteneffectiviteit CCS-alternatieven
Voor deze zeef is in het Klimaatakkoord afgesproken dat jaarlijks de kosteneffectiviteit door een onafhankelijk advies wordt vastgesteld. In opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft Navigant (nu Guidehouse, voorheen Ecofys) in 2019 en 2020 deze onafhankelijke adviezen opgesteld volgens een door hen ontwikkelde methodiek. Op basis hiervan zijn er in de 2020 en 2021 SDE++ subsidieregelingen geen subsidiebeperkingen voor CCS opgenomen.

Voor de komende 2022 SDE++ subsidieregeling wordt volgens het Klimaatakkoord opnieuw een onafhankelijk advies uitgebracht. Deze is in opdracht van het ministerie van EZK uitgevoerd door Royal HaskoningDHV volgens de eerder vastgestelde methodiek. De resultaten worden gepresenteerd in dit rapport.

Selecteren en filteren van alternatieven - van longlist naar shortlist
Op basis van de eerdere adviezen en recente literatuur zijn er binnen 6 categorieën (Energie Efficiëntie, Elektrificatie, Carbon Capture Utilisation (CCU), Feedstocks, Duurzame Energie, en Resource efficiency) 27 alternatieve technologieën geselecteerd. Dit zijn mogelijk kosteneffectieve alternatieven voor CCS en vormen de longlist. Voorbeelden zijn: geothermie, industriële restwarmte, elektrische boilers en CO_2 mineralisatie. Na een voorselectie op basis van 3 criteria blijven er 6 technologieën over. Deze beoordeelden we in meer detail met behulp van 7 criteria waaraan de technologie moet voldoen om een even kosteneffectieve maatregel te zijn als CCS. Bij iedere technologie is minstens één criterium waaraan niet voldaan wordt. De technologieën en de criteria van afvallen zijn:

- Hergebruik industriële restwarmte – hoge onzekerheid endogene kosten;
- Elektrische boilers – hoge onzekerheid exogene kosten;
- Elektrische glasoven – lange implementatietijd, hoge risicoperceptie industrie;
- Directe toepassing CO_2 – lage potentie reductie;
- Biomassa, bionafta en bio-ethanol – hoge onzekerheid endogene kosten;
- Biomassa inzet voor warmte – hoge onzekerheid endogene kosten.

Conclusie
Uit de analyse volgens de methode die in voorgaande jaren is ontwikkeld volgt dat er geen kosteneffectieve alternatieven voor CCS zijn. De relatieve kosteneffectiviteit van een aantal mogelijke alternatieven lijkt ten opzichte van vorige jaren wel toe te nemen. Daarom adviseren wij de bestaande methodiek voor het komend onafhankelijk advies te verfijnen voor meer zekerheid.

Inhoud

1	**De CCS-zeef in het klimaatakkoord**	**1**
1.1	CCS in het Klimaatakkoord	1
1.2	De methode van de zeef	1
2	**Stap 1: Selecteren van alternatieven – longlist**	**5**
2.1	Methode & selectie van alternatieven	5
2.2	De longlist	6
3	**Stap 2: Toetsen aan 3 criteria – shortlist**	**12**
3.1	Methode	12
3.2	Filteren met 3 criteria	13
3.3	De shortlist	19
4	**Stap 3: Evaluatie alternatieven**	**20**
4.1	Methode	20
4.2	Filteren met 7 criteria	23
4.3	Mogelijke CCS-alternatieven	24
5	**Evaluatie van kosteneffectieve CCS-alternatieven**	**25**
6	**Literatuur**	**26**

Bijlagen

A1. Zeef, plafond en horizon uit het Klimaatakkoord

A2. CO_2-reductie potentie van een alternatief

A3. Verdere onderbouwing van de shortlist evaluatie

A3.1 Hergebruik industriële restwarmte

A3.2 Elektrische boiler

A3.3 Elektrische glasoven

A3.4 Directe toepassing

A3.5 Biomassa, bio-nafta, en bio-ethanol als grondstof

A3.6 Biomassa voor verwarming

A4. Gebruikte SDE++ conceptadviezen en overige data voor onzekerheidsmarge berekening

1 De CCS-zeef in het klimaatakkoord

In dit inleidende hoofdstuk leggen we uit wat het doel is van deze inventarisatie van kosteneffectieve alternatieven van CCS (Carbon Capture and Storage). Ook beschrijven we de methode waarmee we de inventarisatie hebben uitgevoerd.

1.1 CCS in het Klimaatakkoord

De Nederlandse industrie is verantwoordelijk voor circa 30% van de Nederlandse broeikasgasemissies. De elektriciteitssector voor circa 23%. In het Klimaatakkoord [1] is de totale CO2-reductieopgave 14,3 Mton in 2030 ten opzichte van 1990. Om dit doel te halen is in de industrie en energiesector een belangrijke rol weggelegd voor CCS op de weg naar volledige decarbonisatie. Bij de totstandkoming van het Klimaatakkoord is enerzijds vastgesteld dat de doelen moeilijk gehaald kunnen worden zonder CCS, maar anderzijds is ook de zorg uitgesproken dat CCS de ontwikkeling van koolstofarme technologieën zou kunnen remmen.

In het Klimaatakkoord is daarom afgesproken dat subsidiëring van de afvang en opslag van CO_2 (CCS) de ontwikkeling van andere technieken om de CO_2-emissie van de industrie terug te dringen niet in de weg mag staan. Om dit te borgen is subsidiering beperkt door het toepassen van begrenzingen op basis van de relatieve kosteneffectiviteit ('zeef'), een maximumbudget ('plafond') en eindjaar ('horizon'). In het Klimaatakkoord zijn deze begrenzingen in weinig detail beschreven. In Bijlage A1 is de volledige tekst uit het Klimaatakkoord opgenomen. Figuur 1 geeft het deel over de zeef.

Zeef: Begrenzing via de zeef zorgt ervoor dat CCS alleen wordt gesubsidieerd op plekken waar op dat moment geen aantoonbare kosteneffectieve alternatieven zijn. Het gaat om het vinden van een balans tussen het voorkomen van verdringing van schone technieken en het benutten van het reductiepotentieel dat CCS biedt voor het behalen van de reductiedoelstelling. Op basis van onafhankelijk advies zal hieraan jaarlijks invulling worden gegeven. Zolang het plafond nog niet is bereikt (zie hieronder), zal de verbrede SDE+ worden opengesteld voor maatregelen waarvoor geen alternatieven zijn.

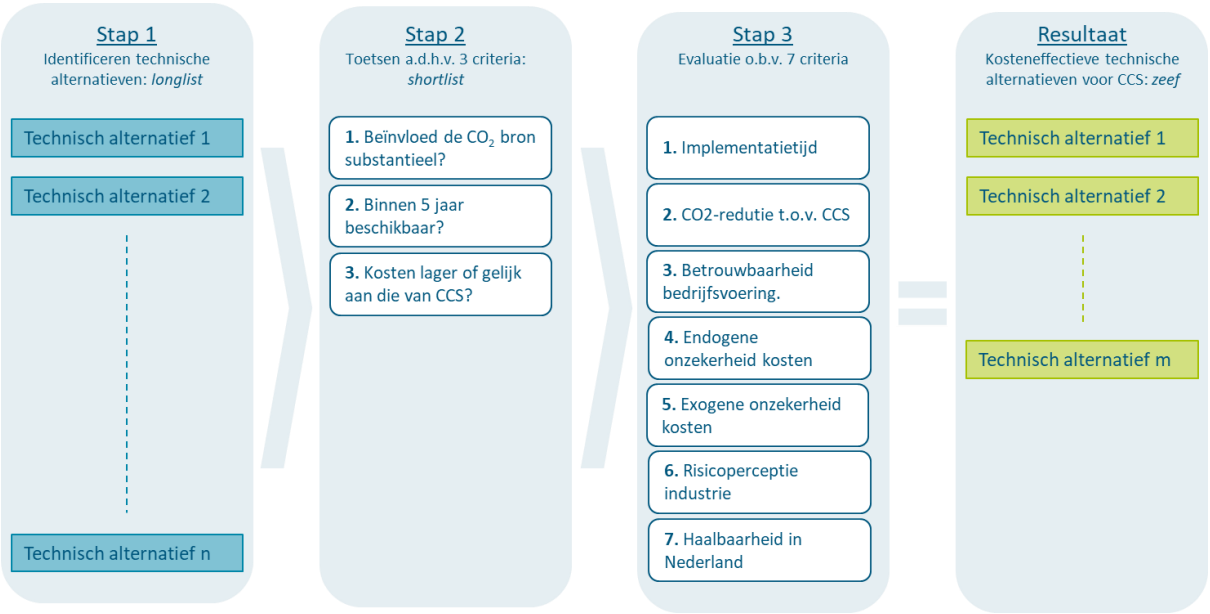
Figuur 1: Beschrijving van de Zeef uit het Klimaatakkoord [1].

In opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft Navigant (nu Guidehouse, voorheen Ecofys) in 2019 in dit kader het eerste onafhankelijke advies uitgebracht [2]. In 2020 heeft Guidehouse vervolgonderzoek uitgevoerd [3]. Op basis hiervan zijn er in de 2020 en 2021 SDE++ subsidieregelingen geen subsidiebeperkingen opgenomen. Voor de komende 2022 SDE++ subsidieregeling wordt volgens het Klimaatakkoord opnieuw een onafhankelijk advies uitgebracht. Dit advies staat in dit rapport.

1.2 De methode van de zeef

Op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat passen we de methode toe zoals deze in 2019 is ontwikkeld door adviesbureau Navigant. Hun rapport [2] en Appendix A van Guidehouse' rapport uit 2020 [3] beschrijft deze methode. Figuur 2 vat deze methode samen.

Er is bewust gekozen voor een aanpak met een focus op bureauonderzoek en beperkte expertconsultatie omdat ten opzichte van de afgelopen jaren de technologische innovaties klein zijn, maar de meetbare (en daarmee in literatuur te vinden) marktfactoren (prijzen) relatief groot.



Figuur 2: Aanpak onderzoek naar kosteneffectieve CCS-alternatieven op basis van methode Navigant / Guidehouse [2] [3].

Methodologische achtergronden en keuzes binnen de methode zijn te vinden in de genoemde twee rapporten. De stappen uit Figuur 2 zijn hieronder op hoofdlijnen beschreven, evenals de punten waarop afgeweken is van de methode. De hoofdstukken 2, 3 en 4 gaan telkens in de eerste paragraaf in op details van de methode van de desbetreffende stap.

Stap 1: selecteren van alternatieven – longlist

De eerste stap inventariseert welke technieken mogelijk technische alternatieven kunnen zijn voor CCS. Deze alternatieven vallen binnen zes categorieën volgens de methode:

1. Energie-efficiëntie;
2. Elektrificatie;
3. Carbon Capture and Utilization (CCU);
4. Feedstock;
5. Duurzame energie;
6. Recycling.

De technologieën die vorig jaar ook zijn geïdentificeerd vormen de basis. Deze lijst is aangevuld op basis van recente literatuur (zie hoofdstuk 2) en markt- en technologieontwikkelingen.

Verdere details staan in §2.1.

Stap 2: Toetsten a.d.h.v. drie criteria

De tweede stap maakt een voorselectie door te toetsen aan drie criteria. Deze drie criteria uit de bestaande methode zijn:

1. *CO_2-reductie t.o.v. CCS* – Alleen CO_2-bronnen waar ook CCS toegepast zou kunnen worden zijn mogelijke alternatieven voor CCS. Ook alternatieve technologieën die leiden tot een grote reductie van de CO2-emissie waardoor de resterende CO_2-bron onder de minimum schaalgrootte voor kosteneffectieve CCS komt, zijn mogelijke alternatieven. In aanvulling op de methode hebben we deze minimale schaalgrootte gekwantificeerd op basis van een recente studie naar CCS [4].

2 *Binnen 5 jaar beschikbaar* – Alleen technologieën die binnen vijf jaar zijn te implementeren zijn mogelijke alternatieven. Dit gaat om de volledige implementatietijd van de technologie, niet alleen om het beschikbaar zijn van de technologie zelf.

3 *Kosten lager of gelijk aan die van CCS* – Alleen technologieën met gelijke of lagere kosten per ton CO_2 zijn mogelijke alternatieven. Omdat we hier een eerste selectie maken, hanteren we hier een hoge drempel zodat twijfelgevallen de evaluatie van stap 3 bereiken.

Verdere details staan in §3.1.

Stap 3: Evaluatie o.b.v. zeven criteria
De derde stap evalueert de mogelijke alternatieven die na de voorselectie van stap 2 zijn overgebleven. Hiervoor zijn de zeven criteria van de methode gebruikt, zie Tabel 1.

Tabel 1: Evaluatie o.b.v. zeven criteria met scoringsmethode

	Criterium	Toelichting en bronnen	● groen	● oranje	● rood
1	Implementatietijd	Beschikbaarheid technologie en voor realisatie en inpassing benodigde middelen en infrastructuur (bijvoorbeeld netaansluiting bij elektrificatie). Op basis van voorbeeldprojecten of haalbaarheidsstudies.	binnen 5 jaar	2026 - 2030	na 2030
2	CO_2-reductie t.o.v. CCS	Vergelijkbare omvang in CO_2-bron beïnvloeding als CCS. Evaluatie op sectorniveau. Op basis van technische inzet en voorbeeldprojecten.	hoog	gemiddeld	laag
3	Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering	Risico's voor het primaire productieproces zoals beschikbaarheid. Op basis van Technology Readiness Level (TRL) uit literatuur, voorbeeldprojecten of haalbaarheidsstudies.	hoog	gemiddeld	laag
4	Endogene on-zekerheid (€/ton)	De onzekerheid in de endogene kosten (investering, aansluitkosten). Op basis van SDE++ data.	laag < 10	gemiddeld 10 - 100	hoog > 100
5	Exogene on-zekerheid (€/ton)	De onzekerheid in de exogene kosten (energieprijzen, kosten emissies). Op basis van SDE++ data.	laag < 10	gemiddeld 10 - 100	hoog > 100
6	Risicoperceptie door industrie	Ook betrouwbare alternatieven (criterium 3) kunnen een risico vormen voor de industrie (bijvoorbeeld: techniek, vergunningen, maatschappelijke discussie). Op basis van voorbeeldprojecten of haalbaarheidsstudies.	laag	gemiddeld	hoog
7	Haalbaarheid in Nederland	Toetsing of er specifieke factoren zijn die de haalbaarheid in Nederland positief of negatief beïnvloeden Op basis van voorbeeldprojecten of haalbaarheidsstudies.	ja	-	nee

Wanneer een alternatief op één van de criteria rood (●) scoort is het geen kosteneffectief alternatief voor CCS.

Verdere details staan in §4.1.

Resultaat
Na de evaluatie kunnen kosteneffectieve alternatieven voor CCS overblijven. Deze vormen de zeef.

Review door PBL
Het ministerie van EZK heeft conceptresultaten van dit onderzoek (stappen 1 tot en met 3 en conclusies) voorgelegd aan het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). De opmerkingen van het PBL zijn verwerkt in dit eindrapport.

2 Stap 1: Selecteren van alternatieven – longlist

In dit hoofdstuk identificeren we CO_2-reductietechnologieën die mogelijk een alternatief kunnen zijn voor CCS. Dit noemen we de longlist. Deze longlist vormt de basis voor stap 2 in hoofdstuk 3 waarin we op basis van drie criteria de longlist reduceren tot een shortlist van technische alternatieven.

2.1 Methode & selectie van alternatieven

Om tot de longlist van alternatieven voor CCS te komen, is een bureaustudie uitgevoerd. Hierbij zijn zowel de eerdere CCS Zeef studies als recente rapporten van IEA [5] [6] [7], CE Delft [8] en Roland Berger [9] doorgenomen om alle mogelijke alternatieven in kaart te brengen. Hierbij is gekeken naar de mate waarin een alternatief onderscheidende eigenschappen heeft ten opzichte van andere alternatieven.

Waar nodig zijn alternatieven gegeneraliseerd (bijvoorbeeld: waterstof voor staalproductie tot waterstof als procesgrondstof) of juist verdeeld naar specifieke eigenschappen (bijvoorbeeld: Elektrochemische processen apart van Procesintensificatie wegens de specifieke eigenschap dat koolstof in de reacties vermeden wordt). Hierdoor ontstaat een longlist van alternatieven met onderscheidenlijke eigenschappen om te toetsen.

Er zijn in totaal 27 technologieën geïnventariseerd die een alternatief zouden kunnen vormen voor CCS in de industrie. In deze analyse is één nieuw alternatief opgenomen ten opzichte van de vorige versie, namelijk Elektrochemische processen. Deze 27 alternatieven zijn overzichtelijk ingedeeld in 6 categorieën, namelijk; Energie Efficiëntie, Elektrificatie, Carbon Capture Utilisation (CCU), Feedstocks, Duurzame Energie en Resource efficiency.

In de analyse worden de alternatieven individueel getoetst. Er worden dus geen combinaties van alternatieven beschouwd. Wel wordt het meervoudig inzetten van een individueel alternatief beschouwd, zoals bijvoorbeeld het gebruik van restwarmte op meerdere punten in een installatie om een grote emissiereductie te bereiken.

2.1.1 Energie-efficiëntie

Het efficiënter inzetten van (fossiele) energie in industriële processen kan naast een kostenbesparing ook leiden tot een CO_2 uitstoot reductie. Doordat een proces minder energie nodig heeft voor dezelfde productiecapaciteit, is er een besparing in het verbruik van fossiele brandstoffen wat leidt tot een reductie van de bijbehorende emissies. Deze reductie kan van dusdanige grootte zijn dat het gebruik van CCS voor de restende CO_2 uitstoot niet meer realiseerbaar is.

In deze categorie zijn de volgende alternatieve maatregelen opgenomen: Efficiëntere droogtechnieken, Efficiëntere scheidingstechnieken, Efficiënte staalproductie, Hergebruik industriële restwarmte, Procesintensificatie en overige energie efficiënte.

2.1.2 Elektrificatie

Door de elektrificatie van industriële processen is het mogelijk om hernieuwbare elektriciteit te gebruiken in plaats van fossiele brandstoffen. Dit is mogelijk door het elektrificeren van de warmtevoorziening, procesaandrijving en/of reactieprocessen, hetzij direct of indirect via een energiedrager. Hierdoor wordt de uitstoot van CO_2 op de locatie van de industriële processen (gedeeltelijk) vermeden, waardoor CCS niet meer nodig is om de uitstoot van deze industrie af te vangen.

In deze categorie zijn de volgende alternatieve maatregelen opgenomen: Elektro-fornuis (voor kraakprocessen), Elektrische boiler, Elektrische glasoven, Warmtepomp, Stoomrecompressie, Elektrisch

verwarmen (inductie, microgolf, infrarood), Elektrochemische processen, en Indirecte elektrificatie: inzet van groene waterstof voor verwarming.

2.1.3 CCU

Door de uitgestoten CO_2 van een sector af te vangen en in te zetten als grondstof in een tweede sector, kan de productie van CO_2 als grondstof worden vermeden. De CO_2 van de eerste sector wordt dan hergebruikt, in andere woorden CCS wordt vervangen door Carbon Capture Utilisation (CCU).

In deze categorie zijn de volgende alternatieve maatregelen opgenomen: CO_2-mineralisatie, Brandstoffen Chemicaliën, en Directe toepassing.

2.1.4 Feedstocks

Fossiele bronnen worden niet alleen als energiebron gebruikt maar ook als grondstof in de industrie voor de productie van diverse producten. Tijdens de productie of aan het einde van de levensduur van het product komt fossiele CO_2 vrij in de atmosfeer (bijvoorbeeld: staalproductie of verbranding van kunststofafval). Door fossiele grondstoffen voor industriële processen uit te wisselen voor alternatieven, kan de uitstoot van fossiele CO_2 door eindgebruikers van de producten en tijdens productie vermeden of gereduceerd worden. Door de vermeden uitstoot van fossiele CO_2 is de noodzaak voor CCS ook (gedeeltelijk) vermeden.

In deze categorie zijn de volgende alternatieve maatregelen opgenomen: Productie groene waterstof en Biomassa, bionafta en bio-ethanol.

2.1.5 Duurzame energie

Diverse duurzame energiebronnen zouden direct (en lokaal) fossiele energiebronnen in de industrie kunnen vervangen en daarmee de CO_2-uitstoot reduceren. Dit door duurzame warmte of aandrijvingsenergie te leveren aan de industrie in plaats van energie uit fossiele brandstoffen. Omdat de industrie een grote energieverbruiker is zou de (gedeeltelijke) vervanging van fossiele brandstoffen door duurzame bronnen de inzet van CCS behoorlijk kunnen beïnvloeden.

In deze categorie zijn de volgende alternatieve maatregelen opgenomen: Zon PV en windenergie, Geothermie, Zonthermie, en Biomassa inzet voor warmte (biomassaketel, biogasfornuis, biogasketel)

2.1.6 Resource efficiency

Door hergebruik van grondstoffen wordt zowel het winnen van nieuwe grondstoffen als de afdanking van oude grondstoffen en, afhankelijk van hoe de loep gesloten is, ook een deel van de uitstoot tijdens de productie vermeden. Doordat producten niet worden verbrand en/of de productie (deels) vermeden wordt, wordt de uitstoot van CO_2 in de keten ook gereduceerd. Hierdoor zou voor sommige sectoren, zoals afvalverbrandingsinstallaties en petrochemie, de inzet van CCS ook vervangen kunnen worden door grondstof-efficiëntie.

In deze categorie zijn de volgende alternatieve maatregelen opgenomen: Mechanische recycling chemie, Chemische recycling chemie, en Waterstof productie uit afval.

2.2 De longlist

Ter overzicht worden in het onderstaande Tabel 2 de geïnventariseerde alternatieven getoond en omschreven. Deze omschrijvingen zijn de primaire kadering van de alternatieven voor de verdere analyse

en selectiestappen. Deze worden verder aangevuld in latere stappen met publieke bronnen en eigen inzichten om tot een oordeel te komen.

Tabel 2: Longlist en omschrijving van alternatieve maatregelen per categorie (overgenomen uit [3] en deels bewerkt).

	Alternatief	Omschrijving
1. Energie efficiëntie	Efficiënte droogtechnieken	Drogen is een veel voorkomend proces in de industrie, bijvoorbeeld bij de productie van voedingsmiddelen, papier, keramiek en chemicaliën. Droogprocessen zijn energie-intensief. Industriële droogprocessen kunnen worden gegroepeerd in directe drogers, indirecte drogers en overige processen. Gezien de grote hoeveelheid aan droogtechnieken en toepassingen, is het niet mogelijk één specifieke technologie te noemen die een proces efficiënter maakt.
	Efficiënte scheidingstechnieken	Er zijn veel technologieën om materialen te scheiden. Dat kan op basis van materiaaleigenschappen en de aggregatietoestand. Betere scheidingstechnologieën leiden tot hogere productkwaliteit en grote besparingen in energie- en grondstoffenverbruik. Hieronder vallen onder andere (nieuwe varianten van) scheidingstechnieken zoals membraanscheiding, centrifuge, filtreren, decanteren, extraheren. Scheidingstechnieken worden in veel sectoren toegepast, maar met name in de chemie, raffinage en voedingsindustrie.
	Efficiënte staalproductie	Er zijn diverse alternatieven voor staalproductie, waaronder efficiëntere staalproductie doormiddel van bijvoorbeeld het HIsarna-proces. Andere alternatieven zoals elektrisch staal en 'direct reduced iron' met waterstof worden als bijhorende basistechniek elders behandeld. HIsarna is een nieuw proces om ruwijzer te maken gebaseerd op de smelt reductie technologie. In vergelijking met conventionele ijzerproductie (het hoogovenproces), kunnen de cokesovens en de sinterfabrieken worden vermeden. Hiermee kan een emissiereductie van circa 20% behaald worden. Een ander verschil met de conventionele route is dat HIsarna een gas produceert met een hoge concentratie CO_2 (boven de 85%). Het procesgas bevat geen stikstof omdat HIsarna werkt met zuurstof in plaats van lucht bij de hoogoven. Dit maakt HIsarna uitermate geschikt voor de afvang van CO_2.
	Hergebruik industriële restwarmte	De vraag naar primair energiegebruik wordt verminderd door het uitkoppelen van restwarmte uit hoge temperatuurprocessen en deze vervolgens te gebruiken om lagere temperatuurprocessen te verwarmen binnen dezelfde fabriek. Deze vorm van warmte-integratie gebeurt al veel, maar er is nog potentieel voor verdere toepassing. De warmte kan ook worden ingezet bij een andere fabriek of in een andere sector, bijvoorbeeld de gebouwde omgeving. In het eerste geval van warmte-uitwisseling leidt dit wel tot een vermindering van de emissies van de industrie, in het tweede geval niet.
	Procesintensificatie	Er zijn drie manieren van procesintensificatie: (1) het vervangen van processen door processen op basis van andere fysieke principes, wat zorgt voor een efficiëntere omzetting, (2) het combineren van twee of meerdere functies in één apparaat, bijvoorbeeld reactieve destillatie, en (3) het uitvoeren van processen in microstructuren. Procesintensificatie kan leiden tot efficiënter gebruik van energie en grondstoffen. Bovendien is het mogelijk de investeringskosten voor installaties omlaag te brengen.

	Alternatief	Omschrijving
	Overige energie-efficiënte	Hieronder vallen alle energie-efficiëntie technieken die niet in één van de bovenstaande categorieën vallen. Aangezien er alternatieven in kaart worden gebracht die directe emissies van de industrie omlaag brengen, zullen elektriciteit besparende technieken alleen als een alternatief gelden als de elektriciteit on-site wordt opgewekt. In deze categorie vallen ook technieken die de efficiëntie van inzet van fossiele brandstoffen verhogen. Digitalisering in industrie kan ook worden ingezet voor energie-efficiënte verbeteringen en behoort ook tot deze groep.
2. Elektrificatie	Elektro-fornuis (voor kraakprocessen)	In kraakprocessen verhitten fornuizen nafta (of gasolie) in aanwezigheid van stoom gedurende zeer korte tijd sterk, waardoor de in de voeding aanwezige hoogmoleculaire stoffen worden gekraakt. In een groot aantal stappen wordt uit het kraakgas de hoofdproducten etheen en propeen verkregen, naast een flink aantal gasvormige bijproducten. Het merendeel van deze stappen bestaat uit destillatieprocessen. De warmte nodig voor het kraakproces wordt normaliter opgewekt door verbranding van fossiele (rest)gassen. In een elektro-fornuis wordt deze warmte opgewekt met elektriciteit. Het toepassen van elektro-fornuizen heeft grote invloed op de energiehuishouding van de processen. Er moet bijvoorbeeld een alternatieve toepassing worden gevonden voor de restgassen die voor de ondervuring werden gebruikt.
	Elektrische boiler	Elektrische boilers leveren warmte voor diverse processen. Deze warmte wordt geleverd in de vorm van stoom of thermische olie als warmteoverdrachtsmiddel. Deze elektrische boilers kunnen de huidig gangbare gasgestookte boilers (en WKK's) vervangen.
	Elektrische glasoven	Elektrische glasovens kunnen worden gebruikt voor het smeltproces in de glasindustrie, waarvoor temperaturen nodig zijn van boven de 1.600 ºC. Deze hoge temperaturen zijn nodig om het louterproces in gang te zetten, waarmee belletjes uit het glas worden verwijderd. Na het louteren wordt de temperatuur afgebouwd ten behoeve van het vormgeefproces. Afhankelijk van de toepassing daalt de temperatuur tot rond de 1.100 ºC. Glasovens zijn nu gasgestookt.
	Warmtepomp	Het werkingsprincipe van een warmtepomp is dat warmte bij een lage temperatuur wordt opgenomen en met een hogere temperatuur wordt afgegeven. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van een vloeistof die bij lage temperatuur verdampt en bij hoge temperatuur condenseert. Het gehele proces van verdampen, comprimeren, condenseren en expanderen vormt een gesloten kringloop waar door middel van elektriciteit energie aan wordt toegevoegd. Op deze manier wordt de warmte opgewaardeerd. De efficiëntie waarmee dit gebeurt wordt uitgedrukt in de COP-waarde.
	Stoomrecompressie	Stoomrecompressie is een technologie die wordt gebruikt om restwarmte in de stoomcyclus te houden in plaats van wegkoelen via condensatie. Om deze restwarmte nuttig te kunnen gebruiken wordt deze middels een compressiestap weer op druk en temperatuur gebracht. Voor het aandrijven van de compressor is elektriciteit nodig, maar dat is een fractie van de teruggewonnen restwarmte. De efficiëntie waarmee dit gebeurt wordt uitgedrukt in de COP-waarde.

	Alternatief	Omschrijving
	Elektrisch verwarmen (inductie, microgolf, infrarood)	Inductie: elektrische stromen veroorzaken warmte door de weerstand in een metaal. De stromen kunnen worden opgewekt door een spanningsverschil of via inductie door een wisselend elektromagnetisch veld. Met deze warmte kunnen chemische processen worden uitgevoerd, zoals kraken en destillatie. Microgolf: toepassingen van microgolf verwarming zijn gebaseerd op het laten trillen van elektrische dipolen in een medium. Door dit trillen ontstaat lokaal warmte. Via de frequentie van de straling is hoge selectiviteit te bereiken die relevant is in chemische processen. Microgolf kan worden ingezet voor zowel droog- als verwarmingsdoeleinden. Infrarood: infrarood stralingspanelen zijn heel goed toepasbaar voor industriële processen waarbij warmte nodig is. Een groot voordeel van infrarood verwarming is dat er geen lange opstarttijden nodig zijn waardoor er een zeer grote tijdwinst gerealiseerd kan worden ten opzichte van de conventionele droog- en verwarmingstechnieken.
	Elektrochemische processen	Bij elektrochemische reacties zijn elektronen de drijvende kracht achter chemische reacties, waardoor chemicaliën en basismetalen geproduceerd kunnen worden. De productie van primaire aluminium is een voorbeeld hiervan, waar doormiddel van elektriciteit de zuurstof van het aluminiumerts verwijderd wordt. Er vindt veel onderzoek plaats om verschillende chemicaliën en basismetalen op deze wijze te produceren, waardoor de vraag naar proceswarmte sterk gereduceerd wordt. Voorbeelden zijn elektrolyse van ijzererts en productie van ammonium via een elektro-katalysator.
	Indirecte elektrificatie: inzet van groene waterstof voor verwarming	De technologie om warmte met waterstof te produceren is vergelijkbaar met warmteproductie uit aardgas. Aangezien waterstof anders brandt dan aardgas is het nodig de branders aan te passen of te vervangen. Bovendien is er een waterstofinfrastructuur nodig om de waterstof te transporteren als het niet ter plekke wordt opgewekt. Warmteproductie met waterstof kan worden gebruikt als duurzaam alternatief voor de productie van hoge temperatuur warmte. Daarmee zou warmteproductie met waterstof conventionele warmteproductie met aardgas kunnen vervangen/verdringen.
3. CCU	CO_2-mineralisatie	Bij mineralisatie wordt CO_2 voor langere tijd of permanent gebonden aan mineralen. De belangrijkste voorbeelden zijn het harden van cement met CO_2 en het produceren van aggregaat door middel van CO_2 en industriële reststromen. Cementhardening met CO_2 is het gebruiken van CO_2 om calciumcarbonaat te vormen in cement. Dit kan gebruikelijke stoomhardening processen vervangen, versnelt het hardingsproces en creëert een permanente opslag van CO_2. Aggregaat kan geproduceerd worden door carbonaatmineralisatie: de reactie van CO_2 met calcium of magnesiumoxide. Deze materialen komen in hogere concentraties voor in industriële reststromen zoals vliegas of bodemas van afvalverbrandingsinstallaties.
	Brandstoffen	Het produceren van brandstoffen door het omzetten van CO_2 vereist veelal waterstof om CO_2 om te zetten naar syngas (hydrogenering). CO_2 kan ook met behulp van micro-organismen of algen worden omgezet. De productie van benodigde waterstof maak deze processen energie-intensief. Voorbeelden van brandstoffen die geproduceerd kunnen worden zijn diesel, kerosine, methanol en methaan. Doordat de CO_2 vrijkomt na verbranding van het product en brandstoffen typisch geen lange levensduur hebben vormt deze categorie geen lange-termijn opslagvorm van CO_2. De categorie kan, onder de juiste omstandigheden, wel fossiele CO_2 vermijden.

	Alternatief	Omschrijving
	Chemicaliën	Het produceren van chemicaliën door het omzetten van CO_2 is een brede set aan technologieën die gebruik kunnen maken van biochemische processen, elektrochemische processen of meer conventionele chemie. Door de reductie van CO_2 die nodig is voor de synthese van chemicaliën is vaak veel energie nodig. Dit kan in de vorm van elektriciteit, zonlicht of bijvoorbeeld waterstof (hydrogeneren) zijn.
	Directe toepassing CO_2	CO_2 vindt directe toepassing in veel verschillende sectoren. De belangrijkste is in voedselproductie. In Nederland is het bekendste voorbeeld hiervan het toevoeren van CO_2 aan kassen in de glastuinbouw. Daarnaast wordt CO_2 in frisdrank en het brouwerijwezen gebruikt. CO_2 wordt ook beperkt toegepast in het produceren van elektronica.
4. Feedstocks	Productie groene waterstof	Waterstof wordt in de industrie al ingezet als grondstof voor onder andere kunstmest en (bio-)raffinage. Door het gebruik van groene waterstof zou dit tot een CO_2-reductie leiden. In de toekomst zou waterstof ook in andere sectoren kunnen worden ingezet, zoals bijvoorbeeld 'Direct Reduction Iron' met waterstof voor ijzerproductie. Groene waterstof wordt geproduceerd door met elektrolyse water te splitsen in zuurstof en waterstof. Voor dit proces is veel elektriciteit nodig. Omdat het hier groene waterstof betreft, zal dit met duurzaam opgewekte elektriciteit moeten gebeuren. Groene waterstof zou dan waterstof gemaakt van aardgas kunnen vervangen en daarmee een CO_2-reductie realiseren bij de productie van waterstof.
	Biomassa, bionafta en bio-ethanol	Biomassa: in de industrie is duurzame biomassa op de lange termijn een oplossing als vervanger van grondstoffen die we nu uit aardolie en aardgas maken, zoals plastics. Als eerste stap worden er dan uit de biomassa grondstoffen voor de industrie gehaald. Het materiaal dat overblijft, kan dan als brandstof dienen om stroom mee op te wekken of als brandstof voor industriële processen waar veel hitte of energie voor nodig is. Bionafta: nafta, een product uit de olieraffinage, is een belangrijke grondstof voor de petrochemische industrie in Nederland. In Nederland zijn drie bedrijven met in totaal vijf naftakrakers, die nafta omzetten in high value chemicals zoals etheen, propyleen, butadieen en aromaten. Fossiele nafta kan (gedeeltelijk) worden vervangen door nafta van biogene oorsprong. Bionafta kan worden geproduceerd door pyrolyse van biomassa – dit product wordt ook wel pyrolyse-olie genoemd. Pyrolyse olie wordt gehydrogeneerd om het geschikt te maken als voeding voor de naftakraker. Dit kan bij de kraker zelf gebeuren, of bij de productie van de pyrolyse-olie. Bio-ethanol: bio-ethanol is ethanol dat is geproduceerd uit biomassa. Dit is een proces dat al lange tijd op grote schaal commercieel wordt toegepast.
5. Duurzame energie	Zon PV en windenergie	Het inzetten van zon-PV en windenergie in de industrie vermindert de elektriciteitsvraag en reduceert daarmee indirecte CO_2-emissies vanuit de industrie.
	Geothermie	Het gebruik van geothermie in de industrie vermindert de warmtevraag en reduceert daarmee CO_2-emissies die anders zouden hebben plaatsgevonden bij het opwekken van warmte door de industrie zelf.
	Zonthermie	Zonthermie omvat het verwarmen van water met behulp van de zon en vermindert de warmtevraag.

	Alternatief	Omschrijving
	Biomassa inzet voor warmte (biomassaketel, biogasfornuis, biogasketel)	Voor conversie van biomassa in andere energiedragers zijn verschillende technieken beschikbaar. Dit valt al gedeeltelijk onder de SDE++.
6. Resource efficiency	Mechanische recycling chemie	Met mechanische recycling wordt hier het terugwinnen en productie van kunststoffen uit kunststofafvalstromen bedoeld. Door het kunststofafval te scheiden naar soorten kunststof, en deze vervolgens te reinigingen en verwerken tot nieuwe granulaat, wordt de verbranding van gebruikte kunststof en de productie van nieuwe kunststof vermeden. Hierdoor wordt uitstoot op twee punten in de keten vermeden: direct wordt de uitstoot van afvalverbrandingsinstallaties gereduceerd door reductie in de afvalstroom, en indirect wordt er uitstoot vermeden bij de productie van nieuwe kunststoffen van gekraakte aardolie.
	Chemische recycling chemie	Met chemische recycling wordt hier de productie van pyrolyse olie uit afvalplastics en vervolgens de inzet van pyrolyse olie in de naftakraker ter vervanging van fossiele nafta bedoeld. Pyrolyse olie moet gehydrogeneerd worden voordat het kan worden toegepast in de naftakraker. Hiervoor is waterstof nodig, en dat moet worden gekocht of gemaakt. In tegenstelling tot de inzet van bionafta worden bij de inzet van pyrolyse olie uit afvalplastics geen directe fossiele emissies (bij het kraakfornuis) vermeden, maar wel indirecte fossiele emissies (bij de AVI) vermeden. De gedachte is dat door het sluiten van de kringloop er minder netto CO_2-emissies ontstaan bij chemische recycling. De efficiëntie van het pyrolyse proces is 75% (gerelateerd aan de energie-inhoud van het afval).
	Waterstof productie uit afval	Waterstof kan worden geproduceerd uit afval door dit te verbranden. Na verbranding blijft een synthetisch gas over, waaruit waterstof kan worden gemaakt.

3 Stap 2: Toetsen aan 3 criteria – shortlist

In dit hoofdstuk starten we met de longlist van het vorige hoofdstuk (§2.2). We beoordelen iedere technologie van de longlist aan de hand van drie criteria. §3.1 beschrijft deze criteria en hoe deze zijn toegepast. Vervolgens beschrijven we dit proces in §3.2 en komen tot de shortlist in §3.3.

3.1 Methode

Om van de longlist tot de shortlist te komen, worden de alternatieven getoetst tegen drie criteria;

1. De CO_2-reductie t.o.v. CCS is van vergelijkbare omvang;
2. Het alternatief is binnen 5 jaar beschikbaar;
3. De kosten zijn lager of gelijk aan die van CCS.

Hieruit volgt een shortlist van alternatieven die nader getoetst worden in een vervolgfase om tot de CCS-Zeef te komen. In de volgende paragrafen wordt het toepassen van de criteria verder toegelicht.

1. De CO_2-reductie t.o.v. CCS is van vergelijkbare omvang
Voor de vergelijkbare omvang wordt er gekeken naar waar CCS relevant zou zijn als CO_2-reductie maatregel in de industrie. Hierbij blijkt de diversiteit aan sectoren en processen van belang, vooral hoe de CO_2 ontstaat en wordt uitgestoten. Dit beïnvloedt hoe een alternatief qua omvang vergelijkbaar is met CCS. Bijvoorbeeld een warmtepomp zou, door de eigenschappen, goed kunnen aansluiten op de laagtemperatuur warmtebehoefte van de voedingsmiddelensector, maar slecht op de hoog-temperatuur warmtebehoefte van de glassector. Toetsing vindt daarom plaats op basis van de relevante sector voor het alternatief waar ook CCS zou kunnen worden toegepast. Een overzicht van deze sectoren en de bepaling hoe deze relevant zijn voor CCS is te vinden in bijlage A2.

2. Het alternatief is binnen 5 jaar beschikbaar
Voor de snelheid van implementatie wordt een ijkpunt aangehouden van vijf jaar na subsidietoewijzing. Deze implementatietermijn is inclusief de ontwikkeling van technologie, het aanleggen van infrastructuur buiten de poort en het inpassen in de bestaande industrie. Dit kan dus betekenen dat een alternatief weliswaar technisch ‘volwassen’ is, maar als implementatie een zeer lange aanlooptijd kent, vormt de maatregel geen alternatief voor CCS. De realisatietermijn van alternatieven wordt ingeschat op basis van lopende of voltooide projecten, of publieke studies.

3. De kosten zijn lager of gelijk aan die van CCS
Voor de kostenvergelijking wordt er gekeken naar de kosten per vermeden ton CO_2. Hierbij wordt een ruime marge genomen waarbij de CCS-kosten gelegd zijn op €180/ton vermeden CO_2. De grens ligt hoger dan de gangbare bandbreedte voor CCS in de SDE++ regeling. Hiermee wordt ondervangen dat alternatieven de shortlist niet halen door onzekerheden en/of spreiding in de onderliggende kostenfactoren.

Voor alle criteria geldt dat deze beoordeeld worden als; ja, nee of ja/nee in het geval van onzekerheid of grensgevallen. De criteria worden stap voor stap beoordeeld, waar bij een ‘ja’ of een ‘ja/nee’ de volgende criteria wordt getoetst, enzovoorts. Als alle drie criteria met een ja of ja/nee worden beoordeeld, gaat het alternatief door naar de shortlist voor verdere analyse. Op deze wijze worden kansrijke- en grensgevallen doorgelaten naar de shortlist voor verdere analyse.

3.2 Filteren met 3 criteria

In Tabel 3 wordt een overzicht gegeven van de filtering met de drie criteria. Hierbij is kort de overweging beschreven ter onderbouwing van de resultaten. Ook is hierin de stapsgewijze toetsing van de criteria terug te zien tot het punt waar een alternatief afvalt. De filtering is tot stand gekomen op basis van geplande projecten van het betreffende alternatief en indien nodig aangevuld met interne expertise van Royal HaskoningDHV.

Tabel 3: Shortlist selectie en overwegingen voor longlist alternatieven (Ja, Nee, Ja/Nee; - = niet bepaald)

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
1. Energie efficiëntie	Efficiënte droogtechnieken	In het algemeen zijn droogtechnieken verantwoordelijk voor slechts een deel van het gehele energieverbruik van een installatie. Een verbetering in efficiëntie van drogen heeft te weinig invloed op de gehele CO_2 bron om een alternatief voor CCS te zijn.	Nee	-	-	×
	Efficiënte scheidingstechnieken	In het algemeen vormen scheidingstechnieken slechts een deel van het gehele energieverbruik van een installatie. Een verbetering in efficiëntie van scheiden van stoffen heeft te weinig invloed op de gehele CO_2 bron om een alternatief voor CCS te zijn.	Nee	-	-	×
	Efficiënte staalproductie	Kijkende naar Hisarna als efficiëntere staalproductie, is een emissiereductie van 20% haalbaar. Daarnaast zijn restende emissies juist zeer geschikt voor CCS, door de hoge concentratie (85%) van CO_2 die vrijkomt bij het proces.	Nee	-	-	×
	Hergebruik industriële restwarmte	Door in grote mate warmte uit te wisselen tussen installaties is het mogelijk om de warmtevraag aanzienlijk te verlagen. In hoeverre de warmtevraag wordt gereduceerd is zeer afhankelijk van de sector en de processen.	Ja/Nee	Ja	Ja	✓

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
	Procesintensificatie	Procesintensificatie kent meerdere vormen die vooral tot efficiëntere productie leiden. Het toepassen van procesintensificatie vormen die leiden tot grote besparingen duurt vaak langer dan vijf jaar en is een aanzienlijke investering voor de langere termijn.	Ja/Nee	Nee	-	×
	Overige energie-efficiënte	Overige maatregelen tot efficiëntieverbetering hebben naar verwachting te weinig invloed op de gehele CO_2 bron om een alternatief voor CCS te zijn.	Nee	-	-	×
2. Elektrificatie	Elektro-fornuis (voor kraakprocessen)	Elektro-fornuizen voor kraakprocessen vereisen verregaande integratie met het kraakproces om op grote schaal toegepast te worden. Het vervangen van de warmtebron in kraakprocessen zou het merendeel van de CO_2 emissies reduceren, met specifieke uitzondering van de geproduceerde syngas bij het kraken. Het is de verwachting dat de eerste elektro-kraakprocessen pas in 2028 of later gerealiseerd worden en nog de nodige ontwikkelstappen moet doorgaan.	Ja/Nee	Nee	-	×
	Elektrische boiler	Stoom wordt veelzijdig toegepast in de industrie en de opwekking ervan met fossiele energiebronnen levert een aanzienlijke bijdrage aan de CO_2 emissies. Op kleinere schaal en in het buitenland worden elektrische boilers reeds ingezet.	Ja/Nee	Ja	Ja/Nee	✓
	Elektrische glasoven	Elektrische glasovens worden reeds op kleine schaal toegepast en kunnen een grote reductie in CO_2 emissies leveren. De kosten zouden vergelijkbaar kunnen zijn met CCS.	Ja	Ja	Ja	✓

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
	Warmtepomp	Warmtepompen kunnen Lage Temperatuur (LT) warmte leveren en daarmee een CO_2 reductie bewerkstelligen. Voor sectoren waar enkel LT warmte vereist is, zou dit kunnen concurreren met CCS. Echter zijn de kosten te hoog voor dergelijk grote installaties.	Ja/Nee	Ja	Nee	×
	Stoomrecompressie	Stoomrecompressie kan de opwekking van stoom met gasgestookte boilers vermijden, maar het heeft een beperkte invloed op de CO_2-bron. Qua realisatietijd en kosten is het concurrerend met CCS.	Nee	-	-	×
	Elektrisch verwarmen (inductie, microgolf, infrarood)	Alternatieve vormen van elektrisch verwarmen hebben naar verwachting een beperktere invloed op de CO_2-bron dan de andere opties in de elektrificatie categorie, door hun specifieke niche toepassing.	Nee	-	-	×
	Elektrochemische reacties	Warmte gedreven processen vervangen met elektrochemische processen voor productie van basischemicaliën en metalen zou de CO_2 bron sterk beïnvloeden, maar zijn momenteel nog onderontwikkeld voor grootschalige toepassing in de komende vijf jaar.	Ja	Nee	-	×
	Indirecte elektrificatie: inzet van groene waterstof voor verwarming	Door de inzet van groene waterstof voor verwarming wordt de CO_2-bron in veel sectoren sterk beïnvloed. Technologische is de overstap van aardgas naar waterstof binnen vijf jaar realiseerbaar voor verwarming. Naar verwachting zullen de prijs en beschikbaarheid van groene waterstof in de komende jaren te beperkend zijn om te concurreren met CCS.	Ja	Ja/Nee	Nee	×

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
3. CCU	CO_2-mineralisatie	Het vastleggen van CO_2 door mineralisatie vindt wereldwijd op kleine schaal plaats. Bij grootschalige toepassing als alternatief (>100kton/jaar) zou de markt voor mineralen verzadigd worden en de prijs inzakken. Hierdoor is mineralisatie beperkt inzetbaar als alternatief voor CCS.	Nee	-	-	×
	Brandstoffen	De inzet van synthetische brandstoffen gemaakt van afgevangen CO_2 zou een sterk invloed op de CO_2 bron kunnen hebben, maar wordt niet op grote schaal verwacht in de komende vijf jaar om een alternatief voor CCS te vormen. Dit komt vooral door het gebrek aan een markt voor de duurdere synthetische brandstoffen.	Nee	Nee	-	×
	Chemicaliën	De inzet van synthetische chemicaliën gemaakt van afgevangen CO_2 zou een sterk invloed op de CO_2 bron kunnen hebben, maar wordt niet op grote schaal verwacht in de komende vijf jaar om een alternatief voor CCS te vormen. Dit komt vooral door het gebrek aan een markt voor de duurdere synthetische chemicaliën.	Nee	Nee	Nee	×
	Directe toepassing CO_2	De inzet van CO_2 als grondstof voor andere sectoren, met name de glastuinbouw en voedingsindustrie, zou een alternatief voor CCS kunnen zijn qua kosten, reductie en implementatietijd. Dit wordt onderstreept door de meerdere bestaande installaties en toepassingen in Nederland, vooral de glastuinbouw.	Ja/Nee	Ja	Ja	✓

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
4. Feedstocks	Productie groene waterstof	De inzet van groene waterstof als alternatief voor grijze waterstof zou een sterke beïnvloeding hebben op de CO_2 bron van met name waterstof en kunstmestproductie. In de komende vijf jaar worden kleinschalige pilots verwacht voor groene waterstofproductie, waardoor een deel van de huidige vraag wordt voorzien. Qua kosten zal het voorlopig nog niet concurreren met CCS in deze sectoren. Dit heeft ook gevolgen voor het toepassen van waterstof als grondstof voor bijvoorbeeld staalproductie.	Ja	Ja/Nee	Nee	×
	Biomassa, bionafta en bio-ethanol	De inzet van biogene grondstoffen ter vervanging van fossiele grondstoffen vindt al op beperkte schaal plaats. Door de substitutie wordt de CO_2 bron bij het eindgebruik of afdanking zeer beïnvloed, maar ook deels bij de productie van de eindproducten. Technisch kunnen de installaties binnen vijf jaar gerealiseerd worden, gezien de ervaring in binnen- en buitenland. En de kosten per vermeden ton CO_2 worden ingeschat als vergelijkbaar met CCS.	Ja	Ja	Ja	✓
5. Duurzame energie	Zon PV en windenergie	De inzet van zon en wind voor elektriciteitsproductie levert een sterke reductie in CO_2 op, echter is de elektriciteitssector uitgesloten van CCS. In industrie zou zon en wind de elektriciteitsproductie vanuit WKK's kunnen vervangen mits er een alternatief is voor de warmteproductie. Hiermee is het vervangen van een WKK in de industrie afhankelijk van het alternatief voor warmtevoorziening.	Nee	-	-	×
	Geothermie	Geothermie als warmtebron zou de industrie kunnen voorzien van Lage Temperatuur (LT) warmte. Hiermee zou het de CO_2 bron deels beïnvloeden, afhankelijk van de sector. De realisatietermijn van geothermie varieert	Ja/Nee	Ja/Nee	Nee	×

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
		sterk, maar kan binnen vijf jaar in gunstige gevallen. Qua kosten is geothermie duurder dan CCS per vermeden ton CO_2, zeker bij diepere putten voor hogere temperatuur bronnen.				
	Zonthermie	Zonthermie heeft een beperkte potentie door seizoensfactoren, ruimte en geleverde temperatuur. Hiermee heeft het een beperkte invloed op de CO_2 bron.	Nee	-	-	✗
	Biomassa inzet voor warmte (biomassaketel, biogasfornuis, biogasketel)	De inzet van biomassa voor warmte wordt al toegepast in Nederland en deels in industrie. Hiermee vormt het een alternatief voor CCS qua fossiele CO_2 reductie, implementatietijd en kosten.	Ja	Ja	Ja	✓
6. Resource efficiency	Mechanische recycling chemie	Door mechanische recycling wordt het verbranden van kunststofafval en (deels) de productie van nieuwe kunststof voorkomen. Echter is de beïnvloeding van de CO_2 bij afvalverbrandingsinstallaties beperkt door het beperkte aandeel van kunststofafval in de te verbranden stroom en zou de vermeden productie van kunststoffen tenietgedaan kunnen worden door buitenlandse export.	Nee	-	-	✗
	Chemische recycling chemie	Door chemische recycling wordt het verbranden van kunststofafval en (deels) de import van aardolieproducten voorkomen. Echter is de beïnvloeding van de CO_2 bij afvalverbrandingsinstallaties beperkt door het beperkte aandeel van kunststofafval in de te verbranden stroom, terwijl de emissies van kunststofproductie nog steeds plaats zullen vinden.	Nee	-	-	✗
	Waterstof productie uit afval	Bij waterstofproductie uit afval zal de koolstof in het afval nog steeds vrijkomen als CO_2, deze zal nog steeds opgeslagen of toegepast moeten	Nee	-	-	✗

		Overweging:	Voldoende invloed op CO2 bron ?	Binnen 5 jaar beschikbaar?	Kosten lager of vergelijkbaar dan CCS?	Naar de shortlist ?
		worden. Voor het laatste wordt gekeken naar de potentie van andere alternatieven.				

3.3 De shortlist

De shortlist bestaat uit zes alternatieven, verdeeld over vier categorieën:

- Hergebruik industriële warmte
- Elektrische boiler
- Elektrische glasoven
- Directe toepassing CO_2
- Biomassa, bionafta en bio-ethanol als grondstof
- Biomassa, inzet voor verwarming

Van de zes alternatieven zijn er drie waarbij er op één of meerdere criteria onzekerheden waren of deze kan concurreren met CCS. Dit wordt, samen met de andere drie alternatieven in de shortlist, verder geëvalueerd bij de eindselectie voor de Zeef: stap 3.

4 Stap 3: Evaluatie alternatieven

In dit hoofdstuk starten we met de shortlist van het vorige hoofdstuk (§3.3). We beoordelen iedere technologie van de shortlist aan de hand van zeven criteria. §4.1 beschrijft deze criteria en hoe deze zijn toegepast. Vervolgens beschrijven we dit proces in §4.2 en komen tot de mogelijke CCS-alternatieven in §4.3.

4.1 Methode

De alternatieven uit de shortlist worden in meer detail getoetst op basis van zeven criteria. Doormiddel van de criteria wordt er dieper op de factoren die de uitvoerbaarheid van alternatieven bepalen ingegaan, in vergelijking tot CCS. Met name aspecten die meewegen in de investeringsbesluit worden breder uitgelicht. De zeven criteria zijn:

1. Implementatietijd;
2. CO_2-reductie t.o.v. CCS;
3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering;
4. Risico perceptie door industrie;
5. Haalbaarheid in Nederland;
6. Endogene onzekerheidsfactor;
7. Exogene onzekerheidsfactor.

In de volgende paragrafen wordt het toepassen van de criteria nader toegelicht.

4.1.1 Implementatietijd

De realisatietermijn voor een alternatief zal vergelijkbaar of korter moeten zijn dan CCS. Dit is van belang om de reductiedoelstellingen te behalen op korte- en middellange termijn en daarmee verdere beperking van het koolstofbudget te realiseren. Ook zal een langere realisatietermijn leiden tot hogere financieringskosten. Er wordt gekeken of de alternatieven binnen vijf jaar na subsidietoewijzing kunnen worden gerealiseerd, dezelfde termijn als voor CCS. Dit wordt bepaald aan de hand van openbare voorbeeldprojecten en -plannen, alsmede aan de hand van de beschikbaarheid van vereiste infrastructuur en technologie.

4.1.2 CO_2-reductie t.o.v. CCS

De beïnvloeding op de CO_2-bron door een alternatief zal van vergelijkbare omvang moeten zijn als CCS. De uitstoot van CO_2 wordt gereduceerd door het alternatief vergelijkbaar met CCS of vervangen door biogene CO_2. Dit criterium wordt geëvalueerd op sectorniveau, waarbij de relevantste sector voor het alternatief bepaald is. De alternatieven worden gescoord als; Laag – wanneer de beïnvloeding minder is dan in het geval van CCS, Midden – als de onzekerheidsbandbreedte de beïnvloeding minder tot vergelijkbaar met CCS dekt, en Hoog – als de beïnvloeding zeker vergelijkbaar of hoger is. De CO_2-bron beïnvloeding is ingeschat op basis van technisch inzicht van de betreffende alternatief en voorbeeldprojecten.

4.1.3 Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering

Een alternatief moet betrouwbaar toegepast kunnen worden om de bedrijfsvoering en CO_2-reductie niet te beperken. Een mogelijke consequentie van onbetrouwbaarheid is hogere kosten of hogere verwachte kosten, waardoor het alternatief niet kostenconcurrerend is. De betrouwbaarheid is ingeschat op basis van

de volwassenheid van de technologie en ervaringen uit projecten waar het alternatief al is toegepast. De alternatieven worden gescoord als; Hoog – voor een vergelijkbare of hogere betrouwbaarheid dan gangbaar is in de industrie, Midden – voor een lagere betrouwbaarheid maar op schaal bewezen, en Laag – voor een nog onbewezen technologie in een industriële context.

4.1.4 Risicoperceptie door industrie

Een alternatief kan een hoger risicoprofiel hebben waardoor de kosten of realisatietijd hoger uitvallen. Dit kan een technisch risico, een vergunningsrisico of maatschappelijke discussie als reden hebben. De risicoperceptie is ingeschat op basis van de toepassing van het alternatief in de industrie, alsmede de bredere maatschappelijk discussie rondom het gebruik van de betreffende energiebron of technologie. De alternatieven worden gescoord als; Laag – voor vergelijkbare of lagere risicoperceptie in de industrie, Midden – voor een hogere risicoperceptie in de industrie, en Hoog – voor een zeer hoge risicoperceptie voor de industrie wegens ingrijpende gevolgen op hoofdprocessen.

4.1.5 Haalbaarheid in Nederland

Sommige CO_2-reductie maatregelen zijn in Nederland niet haalbaarheid wegens het niet beschikbaar zijn van bijvoorbeeld bronnen of ruimte om de maatregel toe te passen. De alternatieven worden daarom getoetst op beperkingen die de haalbaarheid in Nederland specifiek beïnvloeden. Dit is bepaald op basis van voorbeeldprojecten en haalbaarheidsstudies voor het betreffende alternatief. De alternatieven worden gescoord als; Goed – geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend, en Slecht – er zijn beperkingen in Nederland die de haalbaarheid negatief beïnvloeden.

4.1.6 Endogene onzekerheidsmarge

Iedere technologie of maatregel kent een zekere bandbreedte van onzekerheid in de kosten. Voor een alternatief kan de bandbreedte dusdanig groot worden dat het niet meer kostenconcurrerend is. Voor de endogene onzekerheidsmarge van de kosteneffectiviteit van een alternatief is gekeken naar de investeringskosten en variatie in de vollasturen. Dit is berekend op basis van de endogene parameters in Tabel 4 en per alternatief specifieke inputgegevens uit PBL's SDE++ conceptadviezen voor 2022. Welke SDE++ advies is gebruikt voor het betreffende alternatief is terug te lezen in de bijlage A4.
De alternatieven worden gescoord als; Laag - <= €10/ton CO_2, Midden - <= €100/ton CO_2, en Hoog - >€100/ton CO_2.

4.1.7 Exogene onzekerheidsmarge

Iedere technologie of maatregel kent een zekere bandbreedte van onzekerheid in de kosten. Voor een alternatief kan de bandbreedte dusdanig groot worden dat het niet meer kostenconcurrerend is. Voor de exogene onzekerheidsmarge van de kosteneffectiviteit van een alternatief is gekeken naar de financieringskosten en energieprijzen, of in het geval van CCU de kostprijs van CO_2. Dit is berekend op basis van de exogene parameters in Tabel 4 en per alternatief specifieke inputgegevens uit PBL's SDE++ conceptadviezen voor 2022. Welke SDE++ advies is gebruikt voor het betreffende alternatief is terug te lezen in de bijlage A4.
De alternatieven worden gescoord als; Laag - <= €10/ton CO_2, Midden - <= €100/ton CO_2, en Hoog - >€100/ton CO_2.

4.1.8 Overzicht parameters gevoeligheidsanalyse

De kwantitatieve criteria, endogene en exogene onzekerheidsfactoren zijn berekend met behulp van een gevoeligheidsanalyse van de kosteneffectiviteit (euro's per vermeden ton CO_2) op basis van SDE++ conceptadviezen voor 2022. Tabel 4 geeft de parameters weer die zijn gevarieerd om de onzekerheidsmarges te bepalen. Voor alternatieven waarvoor geen literatuurdata beschikbaar is of in de eerdere kwalitatieve criteria al tot een duidelijke conclusie gekomen is, zijn de kwantitatieve criteria niet berekend.

Tabel 4: Overzicht van de gevoeligheidsparameters voor de endo- en exogene onzekerheidsmarges.

Scenario parameters	Eenheid	Laag	Medium	Hoog
Endogeen				
Investeringskosten (verdisconteerd)	Factor	0,5	1,0	1,5
Vollasturen[1]	uur/jaar	8.760	8.000	5.000
Exogeen				
Gasprijs (in 2021)[1]	€/kWh$_{LHV}$	0,028	0,021	0,014
Elektriciteitsprijs (in 2021)	€/kWh	0,042	0,057	0,075
CO_2 prijs voor glastuinbouw[1]	€/tCO_2	99,00	82,50	66,00
WACC[2]	%	3,9%	5,9%	7,8%

[1] *Deze parameters (gasprijs, CO_2 prijs voor glastuinbouw en vollasturen) worden genomen in de berekening als respectievelijk opbrengsten of bedrijfsuren waarover de jaarlijkse investeringskosten worden verdeeld, welke dus tegengesteld werken ten opzichten van de andere parameters die als kosten zijn gevarieerd.*
[2] *WACC = Weighted Average Cost of Capital' = gewogen gemiddelde kosten van kapitaal*

4.2 Filteren met 7 criteria

Tabel 5 toont een overzicht van de resultaten van de filtering met zeven criteria op de zes alternatieven van de shortlist, inclusief een korte onderbouwing van de score per criteria. Verdere onderbouwing van de scores is terug te vinden in bijlage A3.

Tabel 5: Filtering met zeven criteria van de zes alternatieven in de shortlist.

	1. Implementatietijd	2. CO_2-reductie t.o.v. CCS	3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering	6. Risico perceptie door industrie	7. Haalbaarheid in Nederland	4. Endogene onzekerheidsmarge	5. Exogene onzekerheidsmarge
Alternatief:	[Over X jaar]	[laag/gemiddeld/hoog]	[laag/gemiddeld/hoog]	[laag/gemiddeld/hoog]	[goed/slecht]	[€ / t CO_2]*	[€ / t CO_2]*
Hergebruik industriële restwarmte	● Binnen vijf jaar realiseerbaar. Enkel bij complexe warmtenetwerken tussen verschillende partijen kan de aanleg langer duren.	● Gemiddeld. De reductie-potentie is afhankelijk van de huidige mate van warmte integratie en de sector. In sectoren met enkel een lage tot midden temperatuur warmtevraag kan de potentie groot zijn. In sectoren met een HT-warmtevraag en/of directe procesemissies zal de reductie-potentie klein zijn.	● Hoog. Warmte uitwisseling en integratie is een bewezen technologie die reeds veelzijdig wordt toegepast.	● Laag. Zeker restwarmtegebruik binnen een installatie zelf kent een lage risico perceptie doordat alle factoren in eigen handen zijn. Bij uitwisseling tussen installaties van verschillende partijen is de risico perceptie iets hoger.	● Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.	● €190 Hoog. Er is met name grote onzekerheid over de investeringskosten doordat factoren als warmtetransportafstand en temperatuurbereik van een nieuwe warmtenetwerk casus afhankelijk zijn.	● €100 Gemiddeld. Gematigde onzekerheid doordat de economische besparing afhankelijk is van de gasprijsontwikkeling.
Elektrische boiler	● Binnen vijf jaar uitvoerbaar. Voor grootschalige toepassingen is wel een adequate netverbinding nodig.	● Gemiddeld. De reductiepotentie is zeer afhankelijk van de warmtevraag van de installatie, gezien elektrische boilers enkel van toepassing zijn in lage tot midden temperatuur warmte.	● Hoog. Elektrische boilers zijn een bewezen technologie die steeds vaker toegepast worden in Nederland (gezien SDE++ aanvragen).	● Gemiddeld. Voor grootschalige toepassing van e-boilers zijn adequate netaansluitingen nodig die vaak nog gerealiseerd moeten worden.	● Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.	● €55 Gemiddeld. Matige onzekerheid betreft de investeringskosten.	● €240 Hoog. Grote onzekerheden betreft de energiekosten, inkoop elektriciteit en besparing op aardgas.
Elektrische glasoven	● Na 2030. Er is een commerciële pilot met een hybride glasoven in 2023, maar de overstap op volledig elektrisch op grote schaal vereist nog verdere ontwikkelingen o.a. qua inzet van hoge fractie gerecycled glas.	● Hoog, een potentieel van minimaal 85% reductie tot volledig emissievrij.	● Gemiddeld, op kleinere schaal reeds toegepast voor specifieke glasproducten. Verdere technologische ontwikkeling en ervaring nodig voor grotere schaal toepassing.	● Hoog, grote ingreep in het productieproces (m.a.w. totaal vervanging van proces) en nog lage TRL (6-7).	● Goed, geen land specifieke belemmeringen bekend. Producenten zijn betrokken bij de ontwikkelingen van nieuwe technologieën. Wel is economische haalbaarheid sterk afhankelijk van de elektriciteitsprijs in Nederland.	- Niet berekend	- Niet berekend
Directe toepassing	● Binnen vijf jaar uitvoerbaar. Zowel betreft gebruik als transport (via bestaande pijpleiding of per vrachtwagen).	● Laag. Directe toepassing heeft een potentie aan de afnamezijde van 2-2,5Mton/jaar. Dit is een stuk lager dan het beleidsmatige CCS-plafond van 12,7 Mton/jaar en zal daarmee maar beperkt CCS kunnen vervangen.	● Hoog. Directe toepassing wordt reeds meerdere jaren toegepast in binnen- en buitenland. Hierdoor is er veel ervaring en kennis om betrouwbare bedrijfsvoering te realiseren.	● Gemiddeld. Mogelijke maatschappelijke wenteling omtrent het gebruik van fossiele CO2 voor kort-cyclische producten.	● Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.	● €85 Gemiddeld. Door matige onzekerheden betreft investeringskosten.	● €55 Gemiddeld. Door matige onzekerheden betreft de opbrengt uit CO2-rechten en energiekosten.
Biomassa, bionafta en bio-ethanol	● Binnen vijf jaar realiseerbaar. De nodige ervaring uit eerdere projecten is reeds beschikbaar.	● Hoog. Fossiele feedstock vervangen door biogene feedstock leidt tot directe reductie in eindgebruik en ook bij het productieproces zelf.	● Hoog. In buitenland vindt de productie van bijvoorbeeld ethaan uit bio-ethanol reeds plaats en bio-nafta wordt ook al op kleine schaal in Nederland geproduceerd.	● Laag. Discussie over duurzaamheid en beschikbaarheid biomassa geeft onzekerheid, maar deze discussie is beperkt bij toepassing als grondstoffen.	● Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.	● €140 Hoog. Door grote onzekerheden betreft de investeringskosten.	● €10 Goed. Beperkte onzekerheid, al zijn prijswijzigingen voor biogene grondstoffen en eindproducten niet meegenomen in de berekening.
Biomassa inzet voor warmte	● Binnen vijf jaar realiseerbaar. Gereeds veelvoudig toegepast.	● Hoog. Fossiele brandstoffen vervangen door biogene alternatieven leidt direct tot fossiele emissiereductie.	● Hoog. Veel ervaring in Nederland ondanks iets grotere complexiteit vergeleken met aardgas.	● Gemiddeld. Discussie over duurzaamheid en beschikbaarheid biomassa geeft onzekerheid.	● Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.	● €115 Hoog. Door grote onzekerheden betreft de investeringskosten.	● €85 Gemiddeld. Onzekerheid met name gedreven door vermeden uitgaven voor aardgas.

4.3 Mogelijke CCS-alternatieven

Uit de filtering van de zes alternatieven in de shortlist volgt dat er momenteel geen CCS-alternatieven zijn. Dit omdat alle alternatieven op minimaal één punt ‘rood’ scoren, waardoor er geen alternatief is die met zekerheid even of meer kosteneffectief is dan CCS. Dit geldt generiek en per alternatief of sector. Het zou echter wel zo kunnen zijn dat in specifieke casussen en contexten alternatieven net zo of meer kosteneffectief zijn dan CCS.

5 Evaluatie van kosteneffectieve CCS-alternatieven

In dit hoofdstuk worden de eventuele kosteneffectieve alternatieven voor CCS, de methode en uitkomsten geëvalueerd.

Op basis van de methode die in voorgaande jaren ontwikkeld is, zijn er geen kosteneffectieve alternatieven voor CCS gevonden. Voor een casus of sector is daarom op voorhand niet te garanderen dat een alternatief altijd even of meer kosteneffectief is dan CCS. Daarom wordt, in lijn met de methode, CCS niet op voorhand uitgesloten en zullen er geen CCS-voorstellen op de 'Zeef' blijven liggen. Het is met het oog op de klimaatdoelen en het behalen ervan op de korte termijn wenselijk om zoveel mogelijk opties open te houden.

Zoals in §1.2 genoemd, heeft het ministerie van EZK de conceptresultaten van dit onderzoek (stappen 1 tot en met 3 en conclusies) voorgelegd aan het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Op basis van de aanbevelingen van het PBL zijn delen van deze rapportage aangevuld en verduidelijkt. Dit betreft aanscherpingen in definities, het kwantitatief maken van termen, aanvullingen in onderbouwingen van de toetsing (stap 2) en evaluatie (stap 3) van elektrische glasovens (beperkingen bij hogere recyclingspercentages), warmtepompen (in de papier- en voedingsmiddelenindustrie) en recycling en een aanvulling op de evaluatie van CCU (in bijlage A3). De aanbeveling om per sector te evalueren is niet overgenomen. We evalueren op basis van de sector waar het alternatief naar onze inschatting het eerste en meest kosteneffectief kan worden toegepast. We onderkennen dat een analyse per sector waardevol zal zijn, maar voor dit advies is het te omvangrijk.

De resultaten zijn vergelijkbaar met de resultaten van voorgaande jaren, zowel de einduitkomst als grotendeels de long- en shortlist. Dit jaar kwamen de elektrische boiler en elektrische glasoven tot de shortlist en werden elektrochemische processen opgenomen in de longlist. Over het algemeen vinden er ontwikkelingen plaats in de technologie en markt, waardoor meer alternatieven op de longlist komen en meer door de voorselectie tot de shortlist komen. Komende jaren verwachten we verdere van deze verschuivingen. Mogelijk leidt dit tot kosteneffectieve alternatieven voor CCS. Daarom adviseren wij de bestaande methodiek voor het komende onafhankelijk advies te verfijnen voor meer zekerheid.

6 Literatuur

[1] Rijksoverheid, „Klimaatakkoord," 2019.

[2] Navigant in opdracht van het Minesterie van Economische Zaken en Klimaat, „Technische alternatieven voor CCS in Nederland," November 2019.

[3] Guidehouse in opdracht van Minesterie van Economische Zaken en Klimaat, „Vervolgonderzoek technische alternatieven voor CCS in Nederland," December 2020.

[4] Royal HaskoningDHV, „Nationale CO2-opslagbehoefte tot 2035 - Een inventarisatie van de CO2-afvang en opslag (CCS) in Nederland," 30 september 2021.

[5] IEA, „Innovation Gaps - Industry," 2021.

[6] IEA IETS, „End-Use Working Party Webinar on Deep Decarbonization in Industry - Topic sheet," 2021.

[7] IEA IETS, „End-Use Working Party Webinar on Deep Decarbonization in Industry - Report," Industry Energy-related Technologies and Systems, 2020.

[8] CE Delft, „Kosteneffectieve alternatieven voor CCS," 2020.

[9] Roland Berger, „Haalbaarheidsstudie klimaatneutrale paden Tata Steel Netherlands Ijmuiden," 2021.

[10] Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), „Klimaat- en Energieverkenning," 2021. [Online]. Available: https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2021. [Geopend 28 10 2021].

Bijlage

A1. Zeef, plafond en horizon uit het Klimaatakkoord

Royal HaskoningDHV

A1. Zeef, plafond en horizon uit het Klimaatakkoord

BOX: Inperkingen CCS

1. Zeef: Begrenzing via de zeef[51] zorgt ervoor dat CCS alleen wordt gesubsidieerd op plekken waar op dat moment geen aantoonbare kosteneffectieve alternatieven zijn. Het gaat om het vinden van een balans tussen het voorkomen van verdringing van schone technieken en het benutten van het reductiepotentieel dat CCS biedt voor het behalen van de reductiedoelstelling. Op basis van onafhankelijk advies zal hieraan jaarlijks invulling worden gegeven. Zolang het plafond nog niet is bereikt (zie hieronder), zal de verbrede SDE+ worden opengesteld voor maatregelen waarvoor geen alternatieven zijn.

2. Plafond: Daarnaast is de inzet dat het plafond in de verbrede SDE+ voor CCS in de industrie tot 2030 helpt bij een kosteneffectieve transitie tot 2030. Om te borgen dat nieuwe inzichten over de ontwikkeling van technische verduurzamingsopties worden meegenomen, kan het plafond worden bijgesteld bij evaluatiemomenten van het Klimaatakkoord. De hoogte van plafond[52] wordt zodanig vastgesteld dat voor de in de industrie benodigde 14,3 Mton uitstootreductie in 2030 maximaal 7,2 Mton CCS wordt gesubsidieerd.[53]

3. Horizon: De begrenzing in de tijd, door op termijn geen nieuwe subsidiebeschikkingen voor CCS af te geven (met uitzondering van CCS bij negatieve emissies), is nodig om een prikkel te geven om, op plekken waar dat nu nog niet kosteneffectief is, alternatieven voor CCS te ontwikkelen. Na 2035 worden geen SDE+-beschikkingen meer afgegeven voor CCS-aanvragen (uitgezonderd negatieve emissies). Hiermee wordt de tijdelijkheid van subsidiëring van CCS als techniek onderstreept. Het geeft een prikkel tot kostendaling én tot het ontwikkelen van alternatieven. Het biedt tegelijkertijd tot en met 2035 investeringszekerheid voor CCS-projecten die op korte termijn nodig zijn om de kosten van de transitie zo laag mogelijk te houden.

De zeef en de horizon (het moment van uitfasering van subsidiëring) zullen zo worden vormgegeven dat er nu voldoende handelingsperspectief is voor bedrijven om te verduurzamen (met CCS op plekken waar er geen kosteneffectieve alternatieven bestaan), maar dat er tegelijkertijd genoeg prikkels bestaan die er voor zorgen dat er in de toekomst voldoende kosteneffectieve alternatieven voor CCS beschikbaar komen. Het is belangrijk om te realiseren dat de begrenzing van CCS alleen een begrenzing in de subsidiëring van CCS betreft. Daar waar de industrie zonder subsidie kan en wil afvangen en opslaan, zal de overheid geen beperking opleggen. De kosten van CCS worden gedragen door de bedrijven die CO_2 afvangen. Daarbij betaalt het betreffende bedrijf een minstens kostendekkend tarief aan het consortium dat transport, infrastructuur en opslag regelt, verantwoordelijk blijft voor monitoring van de opgeslagen CO_2 en het voorkomen van weglek.

Bijlage

A2. CO_2-reductie potentie van een alternatief

Royal HaskoningDHV

A2. CO_2-reductie potentie van een alternatief

Om de potentie van een alternatief te toetsen wordt er gekeken naar de mate waarin een alternatief CCS overbodig zou kunnen maken. Hierbij zijn twee factoren van belang; wanneer CCS technisch en economisch relevant is om CO_2-uitstoot af te vangen, en de mate waarin een alternatief deze noodzaak kan reduceren door in te grijpen op de bron (door vergaande reductie of substitutie met biogene CO_2/groene waterstof, etc.).

Voor CCS zijn schaalgrootte van de uitstootbron en concentratie van de vrijkomende CO_2-bevattende stroom van belang. Door technische en economische factoren moeten een installatie groot genoeg zijn, qua productie van CO_2, om afvang, scheiding en opslag te rechtvaardigen. De concentratie van de CO2-bevattende stroom bepaald hierin hoe makkelijk het is om de CO_2 af te vangen en te scheiden voor opslag.

Uit een eerdere studie [4] is een grens gesteld op >100kton CO_2 per jaar voor uitstoot per EU ETS-installatie, die voor deze studie aangehouden wordt. Hiermee is totale scope van de studie zo'n 77,5 Mton CO_2 /jaar, waarvan 37 Mton CO_2 per jaar zonder elektriciteitsopwekking, gemiddelde uitstoot over 2016 tot en met 2020. Uit een analyse van CO_2 uitstoot per industriële proces/sector (RHDHV, 2021) volgt de onderstaande tabel die de diversiteit aan CO_2-bronnen weergeeft, kijkend naar de hoofdbron van CO_2 per sector.

Toch is er op hoofdlijnen te schetsen dat het vooral om Midden en Hoog Temperatuur (MT/HT) proceswarmte gaat en directe uitstoot van procesreacties (bijvoorbeeld: ammonia, waterstof en staalproductie) de grootste bijdrage leveren aan de totale CO_2 uitstoot in industrie.
Voor de filtering van de longlist zullen de alternatieven getoetst worden qua potentie betreft het ingrijpen op de onderstaande CO_2-hoofdbronnen.

Tabel 6: Overzicht van CO_2 uitstoot, primaire bron, concentratie per industriële sector.

Sector	2020-2016 [ton/jaar]	Hoofdbron CO_2 uitstoot	Concentratie van CO_2 stroom
Chemie	12,804,244	MT proceswarmte voor chemische reacties.	Laag (5-15%)
Raffinage	10,759,143	MT/HT proceswarmte en procesemissies van kraken en reacties.	Diverse puntbronnen.
Staal	6,318,827	Steenkolen omzetten naar cokes (62%), en inzetten voor HT proceswarmte (32%)	Medium (20-40%)
Ammonia	3,504,777	Productie van waterstof door steam methane reforming.	Zeer hoog (90%+)
Waterstof	1,459,598	Productie van waterstof door steam methane reforming. 40% MT proceswarmte en 60% methane reforming	Medium (20-40%)
Papier	607,454	LT (150-200°C) proceswarmte voor drogen (80%)	Laag (5-15%)
Voeding	585,889	LT(120-300°C) proceswarmte voor koken, pasteuriseren, bakken, drogen, en schoonmaken	Laag (5-15%)
Oliewinning	376,368	Affakkelen en energievoorziening op locatie	Laag (5-15%)
Bouwmateriaal	270,391	HT proceswarmte voor productie van keramische producten	Laag (5-15%)
Aluminium	116,274	Consumptie koolstof anode voor primaire aluminium??	Hoog?
Afval	106,342	Verbranding van koolstof houdende afval.	Laag (5-15%)
Glas	102,988	HT proceswarmte voor glassmelten	Laag (5-15%)

Bijlage

A3. Verdere onderbouwing van de shortlist evaluatie

Royal HaskoningDHV

A3 Verdere onderbouwing van de shortlist evaluatie

A3.1 Hergebruik industriële restwarmte

1. Implementatietijd
Binnen vijf jaar realiseerbaar.
Binnen installaties zijn wijzigingen te realiseren binnen 5 jaar, van concept ontwerp tot realisatie.
Tussen installaties is er warmte-infrastructuur (incl. stoomleidingen) nodig. De afstanden en hoeveelheid bepalen de complexiteit. De meeste industrieclusters hebben plannen voor warmtenetten. Een deel van de plannen wordt binnen 5 jaar gerealiseerd (Rotterdam-Moerdijk) en een deel na vijf jaar (Noordzeekanaal, Noord-Nederland).

2. CO2-reductie t.o.v. CCS
Wanneer restwarmte binnen de industriële installatie wordt toegepast is er sprake van CO_2-reductie omdat warmteproductie uit fossiele brandstoffen vermeden wordt. Deze warmte-integratie is onderdeel van de categorie ‘energie-efficiëntie’. De potentie is afhankelijk van het huidige niveau van warmte integratie en de sector. Voor sectoren met HT-warmtevraag is de potentie beperkt en voor sectoren met MT/LT-warmtevraag groot. Voor sectoren waren de CO_2-emissies gekoppeld zijn aan procesreacties (bijvoorbeeld; huidige waterstof of staalproductie) is er geen potentie, omdat warmte een beperkte rol speelt.

3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering
Hoog. Warmte uitwisseling en integratie is een bewezen technologie die reeds veelzijdig wordt toegepast. Er is sprake van hoge betrouwbaarheid voor warmte integratie binnen de poort, want alle gekoppelde processen zijn in eigen beheer. De betrouwbaarheid is iets lager voor warmte integratie buiten de poort, omdat het bedrijf dan afhankelijk is van andere partijen voor warmtevoorziening.

4. Endogene onzekerheidsfactoren
€190 Hoog. Er is vooral grote onzekerheid over de investeringskosten door factoren zoals warmtetransportafstand en temperatuurbereik van een nieuw warmtenetwerk.

Bij de uitkoppeling van restwarmte van de industrie is de bijdrage van de investeringskosten ten opzichte van de operationele kosten in de haalbaarheid relatief groot. Binnen de industrie zijn er kosten voor hardware zoals warmtewisselaars, pompen, een voorraadvat en leidingwerk en bijkomende kosten voor instrumenten, monitoring en engineering. Deze investeringskosten variëren sterk door de diversiteit in de industriële installaties en worden bepaald door onder andere de ruimtelijke inpasbaarheid (passen extra warmtewisselaars en leidingwerk), de (dis)continuïteit van de beschikbaarheid van de warmte en de noodzaak tot redundantie. De investeringskosten zijn vaak pas na een gedetailleerde engineering studie te ramen.

Buiten de industriële installatie zijn er kosten voor het warmte transport- en distributienetwerk. De kosten van het aanleggen van een warmtenet zijn vaak factoren hoger dan de investeringen binnen de industriële installatie. Ook hier zijn de kosten zonder specifiek tracéstudie niet nauwkeurig in te schatten omdat het afhangt van de lokale situatie (infrastructuur, bouwdichtheid).

Uit kosten-batenanalyses die in het kader van de EED[3] worden uitgevoerd blijkt daarom vaak dat uitkoppeling kosteneffectief is wanneer aangesloten kan worden op een bestaand warmtenet.

5. Exogene onzekerheidsfactoren

[3] *EED: Energy Efficiency Directive 2012/27/EU*

€100 Gemiddeld. Gematigde onzekerheid door afhankelijkheid van gasprijsontwikkeling, en daarmee de vermeden kosten van het alternatief door besparing op gasverbruik.

6. Risicoperceptie
Laag. Restwarmte gebruik binnen een installatie kent een lage risico perceptie doordat alle factoren in eigen handen zijn. Bij uitwisseling tussen installaties van verschillende partijen is de risico perceptie iets hoger door afhankelijkheid van andere partijen.

7. Haalbaarheid in Nederland
Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.

A3.2 Elektrische boiler

1. Implementatietijd
Binnen vijf jaar uitvoerbaar, voor grootschalige toepassingen is wel een adequate netverbinding nodig. Grootschalig elektrische boilers zijn in de industrie reeds gerealiseerd en in bedrijf, vooral in het buitenland maar beperkt in Nederland. In recente SDE++ rondes zijn er meerdere projecten die subsidie toegekend hebben gekregen en (deels) in de komende jaren gerealiseerd zullen worden. Een adequate netaansluiting is wel vereist voor grote elektrische boilers en is sterk afhankelijk van de casus.

2. CO_2-reductie t.o.v. CCS
Gemiddeld. Reductie-potentie is zeer afhankelijk van de warmtevraag van de installatie gezien elektrische boiler enkel van toepassing zijn in lage tot midden temperatuur warmte.
In sectoren met een lage en midden temperatuur warmtebehoefte zou een elektrische boiler de proceswarmte CO_2-neutraal kunnen leveren. Echter zit er een economische beperking aan de reductiepotentie. Het kostenverschil tussen (duurzame) elektriciteit en het gangbare aardgas zorgt er namelijk voor dat een elektrische boiler alleen tijdens goedkope elektriciteitsuren draait. Daarnaast zullen elektrische boilers geen tot amper een CO2-reductie kunnen realiseren voor hoge temperatuur warmte of CO_2 uit chemische reacties in processen.

3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering
Hoog. De elektrische boiler is een bewezen technologie die steeds vaker wordt toegepast in Nederland (gezien SDE++ aanvragen).
Elektrische boilers, met name elektrode boilers voor stoomopwekking, worden reeds meerdere decennia ingezet in de industrie, vooral in het buitenland waar de elektriciteitsprijzen gunstig zijn. Hier zijn elektrode boilers als zeer betrouwbaar gebleken. Ook zijn in de afgelopen rondes van SDE++ subsidies meerdere aanvragen binnengekomen voor elektrische boilers in de Nederlandse industrie. In deze aanvragen worden ze vaak ingezet als aanvullende maatregel op gasboilers, wat de betrouwbaarheid versterkt.

4. Endogene onzekerheidsfactoren
€55 Gemiddeld. Matige onzekerheid betreft de investeringskosten.
In de endogene onzekerheidsmarge weegt vooral de onzekerheid in de investeringskosten zwaar.

5. Exogene onzekerheidsfactoren
€240 Hoog. Grote onzekerheden betreft de energiekosten, inkoop elektriciteit en besparing op aardgas.
In de exogene onzekerheidsmarge weegt vooral de onzekerheid betreft de energieprijzen zwaar. Met name de uitwisseling van energiebronnen leidt tot een dubbele onzekerheidsmarge, doordat de onzekerheid rond de elektriciteitsprijs en gasprijs beiden meetellen.

6. Risicoperceptie
Gemiddeld. Voor grootschalige toepassing van e-boilers zijn adequate netaansluitingen nodig die vaak nog gerealiseerd moeten worden.
Hoewel de technologie van elektrische boilers al langer bestaat en is toegepast op industriële schaal, kunnen netcongestie en beperkte beschikbaarheid van goedkope en duurzame elektriciteit in Nederland een risico vormen.

7. Haalbaarheid in Nederland
Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.
Er zijn geen alternatief specifieke beperkingen gevonden die de haalbaarheid in Nederland zouden beperken. Hierbij worden netcongestie en het huidige beperkte aandeel goedkope (duurzame) elektriciteit tot algemene beperkingen gerekend die voor de meeste elektrificatie alternatieven gelden.

A3.3 Elektrische glasoven

1. Implementatietijd
Na 2030. Er staat een commercieel pilotproject gepland met een hybride glasoven voor 2023, maar volledige elektrificatie vereist nog verdere ontwikkelingen qua schaal en inzet van hoge fractie gerecycled glas. In Nederland produceert de glasindustrie met behulp van grote installaties verpakkingsglas met een hoog percentage gerecycled glas. Het toepassen van een volledig elektrische glasoven in deze sector zal dan nog verdere ontwikkeling vereisen.

2. CO2-reductie t.o.v. CCS
Hoog, potentieel volledig emissievrij tot minimaal 85% reductie.
Indien het gehele productieproces wordt geëlektrificeerd zou deze emissievrij kunnen zijn. Als alleen het glassmeltproces (het primaire proces in glasproductie) geëlektrificeerd wordt bedraagt de reductie circa 85%.

3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering
Gemiddeld, op kleinere schaal reeds toegepast voor specifieke glasproducten. Verdere technologische ontwikkeling en ervaring nodig voor grotere schaal toepassing.
De technologie voor elektrische glasovens zal nog verder ontwikkeld moeten worden voor toepassing op grote schaal in Nederland voor verpakkingsglas. Hierbij zal ook nog kennis en ervaring opgedaan moeten worden qua operationele inzet en productiekwaliteit. Deels zou er al gebruik gemaakt kunnen worden van elektrische glasproductie op kleinere schaal.

4. Endogene onzekerheidsfactoren
- Niet berekend gezien conclusie op andere criteria

5. Exogene onzekerheidsfactoren
- Niet berekend gezien conclusie op andere criteria

6. Risicoperceptie
Hoog, grote ingreep in het productieproces (m.a.w. totaal vervanging van proces) en nog lage TRL (6-7). Een elektrische glasoven gebruikt het gesmolten glas als elektrische weerstand om de hoge temperatuur warmte op te wekken. Er is een nieuwe manier nodig om het glassmeltproces te kunnen beheersen zodat de juiste kwaliteitseisen gehaald worden. Een overstap naar de nog uit te ontwikkelen elektrische glasoven zal voor producenten een operationeel risico met zich meebrengen.

7. Haalbaarheid in Nederland
Goed, geen land specifieke belemmeringen bekend. Producenten zijn betrokken bij de ontwikkelingen van nieuwe technologieën. Wel is economische haalbaarheid sterk afhankelijk van de elektriciteitsprijs in Nederland.

A3.4 Directe toepassing

1. Implementatietijd
Binnen vijf jaar uitvoerbaar, zowel wat betreft gebruik als transport (via bestaande pijpleiding of vrachtwagen).
De meeste huidige toepassingen zijn makkelijk aanpasbaar voor CO_2 uit de industrie. Transport van de CO_2 is mogelijk via pijpleidingen (bestaande zoals (OPAC) of nieuwe (WarmCO_2) en via de weg (AVR Duiven). Hierdoor worden directe toepassing projecten als binnen vijf jaar implementeerbaar gezien.

2. CO2-reductie t.o.v. CCS
Laag. Directe toepassing heeft een potentie aan de afnamezijde van 2-2,5Mton/jaar. Om de CO_2-reductie potentie van CCU te vergelijken met de potentie van CCS, moet er niet gekeken worden naar de CO_2-bron, maar naar de opslag en toepassing capaciteit. De potentiële capaciteit voor CO_2 toepassing aan de afnamezijde wordt geschat op 2 á 2,5 Mton/jaar, vergelijkbaar qua capaciteit met enkel het Porthos project [4]. De totale maximale CO_2 opslag potentie (offshore) ligt op circa 1700Mton, een stuk hoger dan de landelijke potentie voor het direct toepassen van CO_2 over 15 jaar van 37,5 Mton.

3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering
Hoog. Directe toepassing wordt reeds meerdere jaren toegepast in binnen- en buitenland. Hierdoor is er veel ervaring en kennis om betrouwbare bedrijfsvoering te realiseren.
Er is zowel binnen Nederland en internationaal veel ervaring met CCU opgedaan. Betrouwbaarheid van CO_2-afvang geldt voor zowel CCS als CCU, waardoor de risico's beperkt worden tot transport en toepassing. Deze risico's worden als zeer beperkt beschouwd, en daarmee de betrouwbaarheid als hoog.

4. Endogene onzekerheidsfactoren
€85. Gemiddeld. Door matige onzekerheden betreft investeringskosten.

5. Exogene onzekerheidsfactoren
€55. Gemiddeld. Door matige onzekerheden betreft de opbrengt uit CO2-rechten en energiekosten.

6. Risicoperceptie
Gemiddeld. Mogelijke maatschappelijke wenteling omtrent het gebruik van fossiele CO_2 voor kort-cyclische producten.
Zowel CCS als CCU liggen maatschappelijk onder een vergrootglas, onder andere wat betreft de garantie dat CO_2 voor langere termijn wordt opgeslagen. Bij directe toepassing in kort cyclische producten is deze garantie er niet, waardoor projecten een risico kunnen vormen onder maatschappelijk druk.

7. Haalbaarheid in Nederland
Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend, gezien de relatief grote glastuinbouw sector in Nederland als primaire afnemer, reeds gerealiseerde projecten en geplande uitbreidingen.

A3.5 Biomassa, bio-nafta, en bio-ethanol als grondstof

1. Implementatietijd
Binnen vijf jaar realiseerbaar. Er is ruime ervaring en de technologie voor specifieke producten is reeds ontwikkeld en al commercieel ingezet. Het recente besluit van Shell om in Pernis HVO (transportbrandstof), bionafta (inzet in raffinaderij) en biokerosine (brandstof luchtvaart) te gaan produceren vanaf 2024 is een voorbeeld dat dergelijke projecten binnen vijf jaar te realiseren zijn.

2. CO2-reductie t.o.v. CCS
Hoog. Fossiele feedstock vervangen door biogene feedstock leidt tot directe reductie in eindgebruik en ook in het productieproces zelf. Ook kunnen de biogene emissies afgevangen worden waardoor het CCS niet uitsluit. Dit zal echter pas gebeuren als negatieve emissies ook financieel gewaardeerd worden, wat nu niet het geval is.

3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering
Hoog. In buitenland vindt de productie van bijvoorbeeld ethaan uit bio-ethanol reeds plaats en bio-nafta wordt ook al op kleine schaal in Nederland geproduceerd. Zowel in het buitenland als in Nederland groeit het aantal projecten met biogene grondstoffen dat in ontwikkeling is, waardoor de betrouwbaarheid toeneemt.

4. Endogene onzekerheidsfactoren
€140 Hoog. Door grote onzekerheden omtrent de investeringskosten.

5. Exogene onzekerheidsfactoren
€10 Goed. Beperkte onzekerheid, al zijn prijswijzigingen voor biogene grondstoffen en eindproducten niet meegenomen in de berekening.

6. Risicoperceptie
Laag. Discussie over duurzaamheid en beschikbaarheid van biomassa geeft onzekerheid, maar is beperkt bij toepassing als grondstof.

7. Haalbaarheid in Nederland
Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend.

A3.6 Biomassa voor verwarming

1. Implementatietijd
Binnen vijf jaar realiseerbaar.
Reeds veelvoudig toegepast, daarmee technisch uitontwikkeld en kent een korte realisatietijd (< 1 jaar).

2. CO2-reductie t.o.v. CCS
Hoog. Fossiele brandstoffen vervangen voor biogene alternatieven leidt direct tot fossiele emissiereductie. Ook kunnen de biogene emissies afgevangen worden waardoor het CCS niet uitsluit. Dit zal echter pas gebeuren als negatieve emissies ook financieel gewaardeerd worden, wat nu niet het geval is.

3. Betrouwbaarheid in bedrijfsvoering
Hoog. Veel ervaring in Nederland, ondanks iets grotere complexiteit vergeleken met aardgas.

4. Endogene onzekerheidsfactoren
€115 Hoog. Door grote onzekerheden omtrent de investeringskosten.

5. Exogene onzekerheidsfactoren
€85. Gemiddeld. Onzekerheid met name gedreven door de vermeden uitgaven voor aardgas en de bijbehorende onzekere aardgasprijs.

6. Risicoperceptie
Gemiddeld. Technisch gezien zijn er geen risico's. Echter, de discussie over duurzaamheid en beschikbaarheid biomassa geeft onzekerheid. Daarnaast adviseerde de Sociaal Economische Raad (SER) een stop op de directe verbranding van houtige biomassa. Door deze factoren is investeren een groot risico. Biogasinzet is minder omstreden, maar dit is op een kleinere schaalgrootte dan CCS.

7. Haalbaarheid in Nederland
Goed. Geen specifieke beperkingen voor Nederland bekend, wel is er weinig lokale biomassa waardoor toepassing leunt op import.

Bijlage

A4. Gebruikte SDE++ conceptadviezen en overige data voor onzekerheidsmarge berekening

Royal HaskoningDHV

A4. Gebruikte SDE++ conceptadviezen en overige data voor onzekerheidsmarge berekening

Technologie	Gebruikte bronnen
■ Hergebruik industriële restwarmte	PBL, Conceptadvies SDE++ 2022 Benutting restwarmte uit industrie of datacenters, 2021
■ Elektrische boilers	PBL, Conceptadvies SDE++ 2022 Industriële elektrische boilers, 2021
■ Elektrische glasoven	- Niet berekend -
■ Directe toepassing	PBL, Conceptadvies SDE++ 2022 CO2-afvang en -gebruik (CCU) in de glastuinbouw, 2021
■ Biomassa, bionafta en bio-ethanol	PBL, Conceptadvies SDE++ 2022 Etheenproductie uit biogene grondstoffen, 2021;
■ Biomassa inzet voor warmte	PBL, Conceptadvies SDE++ 2022 Verbranding en vergassing van biomassa, 2021; PBL, Conceptadvies SDE++ 2022 Vergisting, 2021