

Deloitte.



CLIMACT



Leverbaarheden 4, 6 en 9

Transitiepotentieel van de Vlaamse industrie, Roadmapstudie en Ontwerp van transitiekader

Oktober 2020

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Lexicon	26
Introductie	27
Aanpak	30
Centraal verkenningsscenario	37
Varianten op het centraal verkenningsscenario	90
Belangrijkste conclusies o.b.v. de 3 verkenningsscenario's	101
Roadmap naar 2050	104
Appendix A: Opgenomen technologieën	114
Appendix B: Technologische assumpties in centraal verkenningsscenario (MIX)	119
Appendix C: Achtergrondinformatie thematische transitiepaden	124
Appendix D: Methode berekening CAPEX & OPEX	137
Appendix E: Opbouw modellering	146

Samenvatting

Hoe kan de Vlaamse energie-intensieve industrie bijdragen tot significante emissiereducties door in te zetten op technologische innovaties? Om die vraag te beantwoorden heeft een consortium van Deloitte, VUB-IES, AMS en Climact met bijdrage van Wuppertal Institute, een analyse gemaakt van mogelijke transitiepaden, hun potentiële impact en de bijbehorende randvoorwaarden.

Context

De Europese Unie wil het eerste klimaatneutrale handelsblok worden tegen 2050

Vlaanderen heeft de afspraken van **het Parijs Klimaatakkoord** onderschreven, met als doelstelling om de klimaatverandering te beperken tot ver onder 2°C (met als streefwaarde 1,5°C) ten opzichte van het pre-industriële tijdperk.

In het kader van het Parijs Klimaatakkoord heeft de **Europese Unie** de ambitie geformuleerd om klimaatneutraliteit te bereiken tegen 2050. Daartoe zullen de broeikasgassen tegen 2050 met minstens 90% gereduceerd moeten worden t.o.v. 1990 voor wat betreft de bruto-emissies¹.

De EU heeft als interim mijlpaal gesteld de emissies tegen 2030 al met minstens 40% te verminderen (basisjaar 1990). Sectoren die vallen onder het Europese Emissiehandelssysteem (EU ETS) moeten 43% CO₂-emissies verminderen tegen 2030 (basisjaar 2005). Niet-ETS-sectoren moeten 30% CO₂-emissies verminderen tegen 2030 (basisjaar 2005). De Europese Commissie onderzoekt momenteel of deze ambitie verhoogd kan worden naar 50 tot 55% in 2030. De Commissie Von der Leyen publiceerde op 11 december 2019 de Green Deal met diverse beleidsplannen om deze klimaatdoelstellingen te behalen en gaat tevens in op de hiervoor noodzakelijke transitie van de Europese industrie.

Om de transitie die deze ambitieuze doelstellingen met zich meebrengt te ondersteunen, worden financiële middelen vrijgemaakt. Het Herstelplan voor Europa voorziet in een totaalbudget van €1.800 miljard euro, waarvan €750 miljard via het Next Generation EU-fonds, waarvan minstens 30% voor klimaattransitie wordt bestemd. Het Innovation Fund dat zich specifiek richt op de ondersteuning van demonstratie van innovatieve low-carbon technologieën voorziet €10 miljard.

Vlaanderen onderschrijft de doelstelling van een klimaatneutraal Europa in 2050². Voor wat betreft de ETS-sectoren, schrijft Vlaanderen zich in in de context die Europa bepaalt voor deze sectoren met een dalende

¹ Op basis van de langetermijnstrategie van de Europese Commissie. Zie tabel 9 van de 'In depth analysis' bij A Clean Planet for All. Met bruto-emissies wordt verwezen naar de economie-wijde emissies exclusief CO₂ opname in bodems en bossen en exclusief negatieve emissietechnologieën.

² Zie visienota Green Deal, punt 3.2.1. https://www.ewi-vlaanderen.be/sites/default/files/visienota_green_deal.pdf

emissieruimte onder het EU ETS. Dit staat ook zo in de Vlaamse Klimaatstrategie 2050³.

Binnen deze context van sterke klimaatambities en een dalend emissieplafond onder het EU ETS, zal de Vlaamse industrie steeds meer aangespoord worden om haar emissies sterk te reduceren, zowel op korte (horizon 2030) als op langere (horizon 2050) termijn. Een goede voorbereiding en omkadering zal noodzakelijk zijn om deze transitie te laten slagen en tegelijkertijd het competitieve karakter van de industrie in Vlaanderen te vrijwaren.

Doel van deze studie

Het doel van de roadmapstudie is om in kaart te brengen welke en hoe innovaties kunnen bijdragen aan de klimaattransitie in de energie-intensieve industrieën in Vlaanderen

Deze studie onderzoekt welke technologische innovaties en transitiepaden mogelijk zijn voor het bereiken van significante CO₂-reducties tegen 2050 in de energie-intensieve industrie en wat de implicaties van elk van deze pistes zijn op het vlak van energie- en feedstockverbruik en een gedeeltelijke inschatting van de kosten, zijnde deze gerelateerd aan de implementatie van innovatieve technologieën. Daarbij wordt rekening gehouden met de kenmerken en huidige waardeketens van deze sectoren in Vlaanderen, die in Leverbaarheid 2 in kaart zijn gebracht. Op basis van deze mogelijke pistes en hun impact hebben we de noodzakelijke voorwaarden, uitdagingen, randvoorwaarden en opportuniteiten geïdentificeerd die deze transitiepaden met zich meebrengen. Deze analyse resulteert in een roadmap met een aanzet tot stappenplan van te ondernemen acties tussen nu en 2050. Deze roadmap vormt samen met onze voorgaande analyse over het Vlaams industrieel weefsel en de status van de technologieën de basis voor de beleidsaanbevelingen die zijn voorgesteld in een apart document (Leverbaarheid 8 – Flankerend beleid).

Scope van deze studie

Deze studie focust op de Vlaamse basisindustrie. Die vertegenwoordigt 9,1% van de toegevoegde waarde, maar tegelijkertijd ook ±35% van de CO₂-emissies in Vlaanderen

De energie-intensieve sectoren in ons onderzoek betreffen de (petro)chemie, raffinage en staal⁴ als kernsectoren en in beperkte mate is voor wat betreft de warmtevraag ook gekeken naar de sectoren voeding, papier, non-ferro, glas en keramiek. Deze sectoren, die een belangrijke bijdrage leveren aan Vlaanderen met 9,1% van de toegevoegde waarde en 343.000 directe en indirecte banen, staan samen in voor 27,3 Mton CO₂-emissies, waarvan grootste aandeel voor de sectoren chemie (9,0 Mton), raffinage (5,7 Mton), Ijzer en staal (9,7 Mton). Dit vertegenwoordigt ongeveer 35%⁵ van het jaarlijkse Vlaamse totaal aan CO₂-emissies. Deze energie-intensieve sectoren

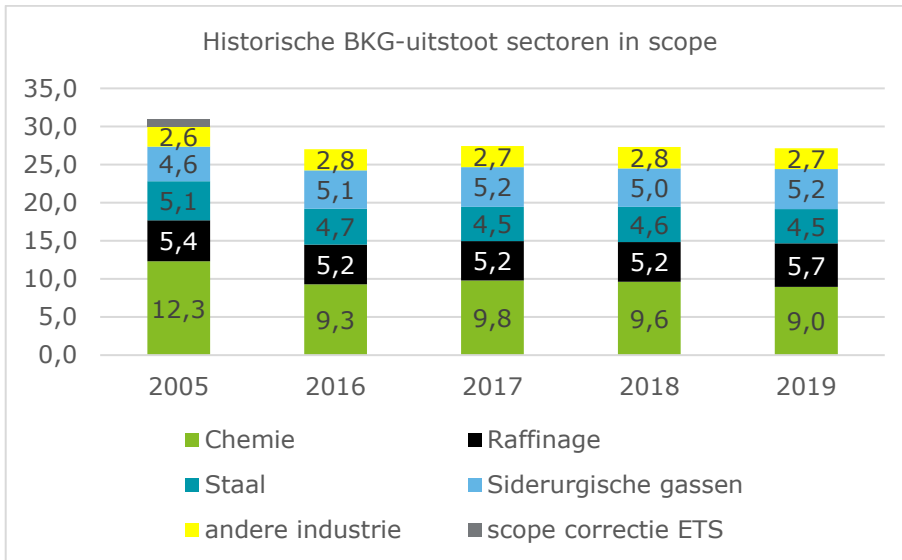
³ Zie Vlaamse Klimaatstrategie, punt 2.1.
https://omgeving.vlaanderen.be/sites/default/files/atoms/files/2019-12-20_VlaamseKlimaatstrategie2050.pdf

⁴ Onder de staalsector wordt ook de productie van ruwijzer gevat, alsook de siderurgische gassen die momenteel worden ingezet voor elektriciteitsproductie.

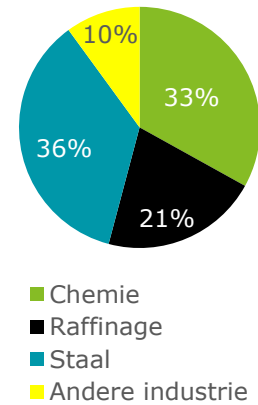
⁵ De Vlaamse BKG-emissies bedroegen volgens de broeikasgasinventaris (CRF-tabel) 77,7 Mton CO_{2eq.} in 2018, exclusief emissies uit bodems en bossen (LULUCF).

zullen voor wat de industrie betreft daardoor een bepalende rol spelen in het behalen van de klimaatdoelstelling.

Overzicht van de sectoren in scope



Aandeel verschillende sectoren in de BKG-uitstoot



Figuur 1 Historische BKG-emissies van de sectoren in de scope van deze studie + hun aandeel in de totale gedekte emissies. Bron: Vlaamse Overheid⁶

Het energiesysteem wordt niet volledig meegenomen in deze studie. In het bijzonder de elektriciteitsproductie, en het elektriciteitssysteem, werden niet onderzocht⁷. Toch is de transitie in de energiesector waaronder de elektriciteitssector onlosmakelijk verbonden met de industriële transitie: het verzekeren van voldoende, betrouwbare, betaalbare, klimaatneutrale energie (onder meer in de vorm van elektriciteit of andere klimaatneutrale energiedragers) is een cruciale randvoorwaarde om de transitie in de industrie te kunnen waarmaken. Daarom is bij de ontwikkeling van de verkenningsscenario's voor deze studie getracht om de energievraag en in het bijzonder de vraag naar elektriciteit te beheersen. Bovendien nemen wij in deze studie de assumptie dat de geconsumeerde elektriciteit klimaatneutraal wordt opgewerkt. Dit is een sterke assumptie en benadrukt het belang van de energietransitie die de klimaattransitie voor alle sectoren, waaronder de industrie moet faciliteren. De warmteproductie voor de sectoren in scope wordt wel meegenomen.

Bovendien beperkt dit onderzoek zich tot de industrie en vormen emissies van andere sectoren zoals gebouwen en transport of emissies uit de productie van biomassa zoals bosbouw of emissies van landbouw of afvalverwerking geen voorwerp van dit onderzoek. Wel is het zo dat de transitie in die sectoren de vraag naar bepaalde industriële producten kan doen toenemen. Denk hierbij bv. aan het isolatiematerialen om huizen en gebouwen te isoleren of aan de productie van lichtere materialen voor voertuigen opdat hun verbruik

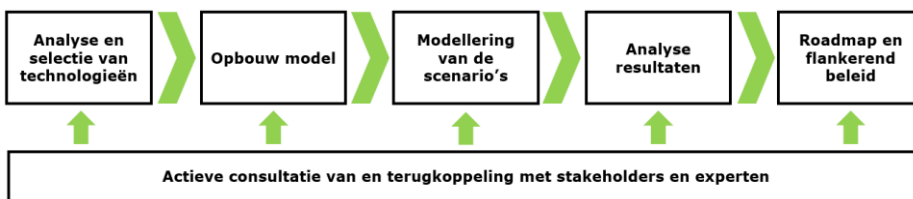
⁶ Cijfers o.b.v. ETS-data zoals gepubliceerd op de website van Departement Omgeving en scope correcties zoals opgenomen in het Voortgangsrapport 2016-2017. Alle emissies van de elektriciteitscentrales in Knippegroen en Rodenhuis zijn toegewezen aan de staalsector, gezien deze voornamelijk voortkomen uit de verbranding van siderurgische gassen. Er is ook vanuit gegaan dat jaarlijks ongeveer 900 kton CO_{2eq} in de raffinaderijen gelinkt zijn aan de naftakraker binnen de raffinaderijen: deze zijn in deze grafieken verschoven van de raffinage- naar de chemiesector.

⁷ De invoer en productie van bio-brandstoffen, waterstof, syn-brandstoffen en intermediaire warmte werd wel meegenomen in de scope van onze opdracht.

daalt. Bij de ontwikkeling van de verschillende scenario's werd daarom gekozen om de productieniveaus van deze sectoren te behouden en zelfs licht te laten stijgen naar 2050 toe. Afhankelijk van de economische realiteit of het gekozen beleid, kan het productieniveau verder toenemen of afnemen.

Aanpak van de scenario's en opbouw van het model

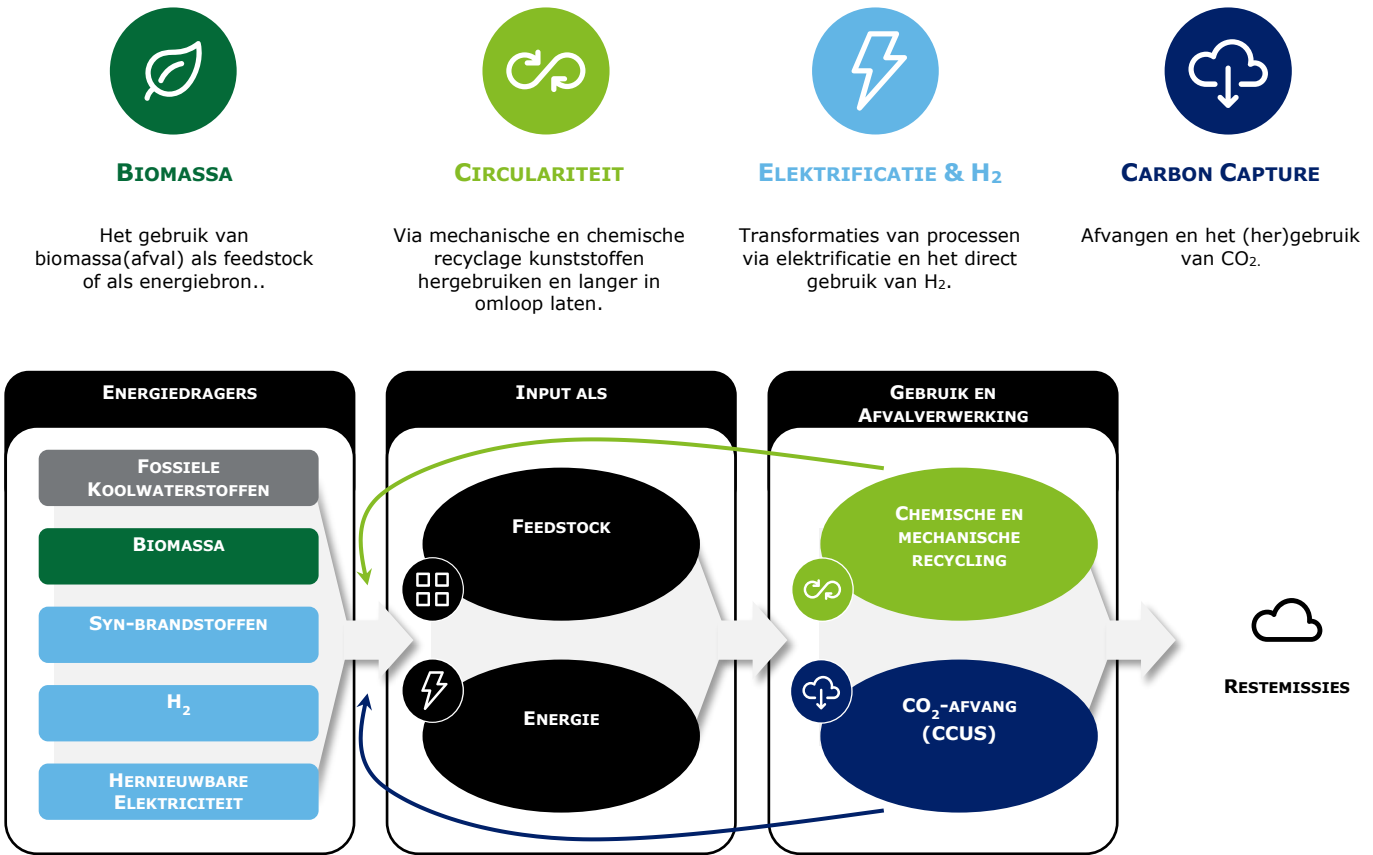
Wij hebben tijdens dit onderzoek geopteerd voor een gefaseerde aanpak, waarbij we bij elke fase van het onderzoek heel veel aandacht hebben geschonken aan gedegen experten bevraging en stakeholderbetrokkenheid. Onze gefaseerde aanpak omvat volgende stappen:



Figuur 2 Een gefaseerde aanpak voor de ontwikkeling van een roadmap 2050

Deze studie vertrekt van de analyse van de verschillende technologische mogelijkheden met aandacht voor de eigenheid van het Vlaams industrieel weefsel

De onderzochte opties voor emissiereducties kunnen in het algemeen onder vier thematische transitiepaden ondergebracht worden, zijnde het gebruik van biomassa als energie- en grondstof, elektrificatie en waterstof (H₂), het afvangen en opslaan van CO₂ (CCS) en gebruik van CO₂ (CCU) en circulariteit (voornamelijk hergebruik van plastic). We houden ook rekening met de thema's die in het kader van het Moonshot innovatieprogramma worden onderzocht. Naast technologische innovaties kijken we ook naar de mogelijkheden voor sectorkoppeling.



Figuur 3 Vier thematische transitiepaden (boven) en de manier waarop energie wordt behandeld in de transitiepaden (onder).

Deze studie werd onderbouwd door een kwantitatief model waarmee de industriële toekomstige productie in Vlaanderen kan worden gesimuleerd

Ter onderbouwing van deze studie werd een kwantitatief model ontwikkeld dat toelaat om de potentiële ontwikkelingen inzake de industriële productie in Vlaanderen te simuleren. Concreet laat het model toe om verschillende evoluties te veronderstellen m.b.t.:

- Het productieniveau per type industrieel product.
- De technologiemix waarmee de verschillende producten worden gemaakt.
- De efficiëntieverbeteringen die worden verwacht per technologie.
- Mogelijke fuel switches binnen elke technologie.
- De toepassing van CO₂-afvang voor elke technologie.

Vervolgens brengt het model de impact van deze assumpties op de broeikasgasemissies, energie- en feedstockverbruik en de kosten (CAPEX/OPEX) voor implementatie van nieuwe innovatieve technologieën in kaart. In lijn met de scope van dit onderzoek gaat het model niet in op het gehele energiesysteem (productie en distributie van elektriciteit of andere energiedragers), noch op evoluties in andere sectoren buiten de Vlaamse industrie, noch werden economische parameters in rekening gebracht.

Het is belangrijk om te benadrukken dat **het gehanteerde model geen optimalisatiemodel is en dat het dus niet automatisch de meest kostenefficiënte route berekent om tot een gewenst resultaat (bv. emissiereducties tegen 2050) te komen (backcasting)**. Het is

daarentegen een simulatiemodel, waarbij het eindresultaat en de route daarnaartoe het resultaat zijn van de assumpties en keuzes die de gebruiker invoert (forecasting). Zo laat het toe de impact van variërende assumpties transparant in kaart te brengen. Op basis van vooraf geïdentificeerde scenario's hebben we aan de hand van het model simulaties uitgevoerd⁸.

Met dit model werden een aantal verkenningsscenario's uitgewerkt ter onderbouwing van deze studie.

Op basis van het hierboven beschreven model werden een aantal scenario's ontwikkeld voor deze studie:

- In eerste instantie werd er een **referentiescenario BAU** (zonder interventies) doorgerekend om de verwachte evoluties tot 2050 in kaart te brengen.
- Vervolgens werd het potentieel van elk transitiepad apart in kaart gebracht. Daartoe werden **vier 'maximale' scenario's** uitgewerkt waarin telkens maximaal werd ingezet op één van de vier thematische transitiepaden: **BIO max** (biomassa-route), **CIRC max** (circulariteit-route), **ELEC max** (elektrificatie-route incl. waterstof) en **CCUS max** (carbon capture-route en inzet van synthetische brandstoffen).
- Op basis van deze analyse, hebben we dan **drie gecombineerde scenario's** ontwikkeld die inzetten op een combinatie van de vier transitiepaden, zijnde een centraal verkenningsscenario (**MIX**) en twee variaties van dit centraal verkenningsscenario ('Var1' en 'Var2'). De variaties houden - voor wat betreft de belangrijkste productieprocessen - rekening met alternatieve energieprijzen en daaruit volgend alternatieve technologiekeuzes om het effect hiervan te kunnen onderzoeken. Deze beperkte, bijkomende analyse geeft een eerste indicatie van het effect van energieprijzen op de technologiekeuze. Een grondige analyse van het effect van energie- en technologieprijzen op de verwachte technologiemix (bv. via optimalisatie) ligt buiten de scope van deze studie en vereist verder onderzoek.

Deze scenario's zijn opgebouwd o.b.v. wetenschappelijk onderzoek, overleg met verscheidene experts en gevalideerd volgens de governance van het project. Tijdens verschillende werksessies zijn de onderliggende assumpties, technologie-keuzes, datapunten, etc. besproken. Daarnaast zijn deze verder doorgesproken met experts en sectorfederaties. Vervolgens zijn deze ook finaal besproken tijdens de stuurgroepen van het project.

Voor de opbouw van het centraal verkenningsscenario is er rekening gehouden met een aantal principes zoals:

- het nastreven van belangrijke emissiereducties tegen 2050.
- het maximale behoud van de bestaande waardeketen (bv. geconcentreerde focus op die stappen in de waardeketen die de meeste emissies veroorzaken, vermijden van vroegtijdige vervanging van installaties) en bestaande roadmaps van bedrijven uit de industrie.
- technologieneutraliteit (geen enkel thematisch transitiepad bij voorbaat uitsluiten).
- het inbouwen van innovatieve technologieën die verder onder een innovatieprogramma onderzocht kunnen worden.

⁸ De scenario's zijn opgebouwd o.b.v. wetenschappelijk onderzoek, overleg met verscheidene experts en gevalideerd volgens de governance van het project. Tijdens verschillende werksessies zijn de onderliggende assumpties, technologie-keuzes, datapunten, etc. besproken. Daarnaast zijn deze verder besproken met experts en sectorfederaties. Vervolgens zijn deze ook finaal besproken tijdens de stuurgroepen van het project.

- circulariteit en het hanteren van een koolstofslimme benadering (maximale valorisatie van koolstof door deze terug te brengen in de waardeketen en zo emissies in de atmosfeer te vermijden).
- de inzet op industriële symbiose.
- het vermijden van grote afhankelijkheid van bepaalde energiebronnen en feedstocks.
- Er werd echter niet expliciet rekening gehouden met de kostenefficiëntie/business case van de gehanteerde energie- en technologiemix⁹.

De ontwikkelde scenario's zijn bedoeld als verkenningen om het potentieel van de verschillende transitiepaden in kaart te brengen, gemeenschappelijke elementen te identificeren, mogelijke synergieën en symbioses te verkennen, een idee van ordegrrootte te krijgen over de potentiële emissiereducties, het energie- en feedstockverbruik en de verwachte OPEX/CAPEX gerelateerd aan de implementatie van nieuwe innovatieve technologieën en de belangrijkste randvoorwaarden, uitdagingen en opportunititeiten te identificeren.

De scenario's moeten dus niet beschouwd worden als toekomstvoorspellingen noch als een te volgen ontwikkelingspad. Hoe de toekomst er uiteindelijk zal uitzien zal afhangen van verdere technologische ontwikkeling, de evolutie van economische factoren (o.a. energie- en feedstockprijzen, marktevoluties) en beleidskeuzes (bv. reductiedoelstellingen en evolutie van CO₂-prijzen) en internationale ontwikkelingen.

Op basis van de scenarioanalyse is er vervolgens een **roadmap** uitgewerkt als ondersteuning voor de industriële transitie (zie verder) en werden **beleidsaanbevelingen** ontwikkeld die zijn opgenomen in 'Leverbaarheid 8 - Flankerend beleid'.

Belangrijkste resultaten van de onderzochte scenario's

Bij de bespreking van de resultaten is het belangrijk te vermelden dat de economische haalbaarheid hiervan onderhevig is aan een aantal randvoorwaarden zoals beschreven vanaf p 19.

Er bestaat geen 'silver bullet' om een koolstofcirculaire en CO₂-arme industrie te bereiken, maar de combinatie van verschillende transitiepaden biedt potentieel om belangrijke emissiereducties te realiseren en tegelijkertijd een innovatieleider te worden.

Potentiële emissiereducties

Elk thematisch transitiepad (de maximale scenario's) heeft reductiepotentieel, maar geen enkel individueel transitiepad realiseert voldoende significante CO₂-reductie, zonder bijkomende hoge inzet van CO₂-afvang. De analyse toont aan dat significante emissiereducties (tussen de 85 tot 90% reductie t.o.v. 2005) enkel mogelijk zijn door een combinatie van de onderzochte transitiepaden. Daarbij blijft de inzet van CO₂ afvang op

⁹ Er werd enkel op benaderende wijze rekening gehouden met kostenefficiëntie, door bv. de huidige waardeketen maximaal te behouden, technologieën met een hoog energie- en grondstofverbruik en weinig perspectief op efficiëntieverbeteringen geen of slechts een beperkte rol te laten spelen, etc.

geconcentreerde resterende fossiele emissies noodzakelijk om significante reducties te verwezenlijken¹⁰.

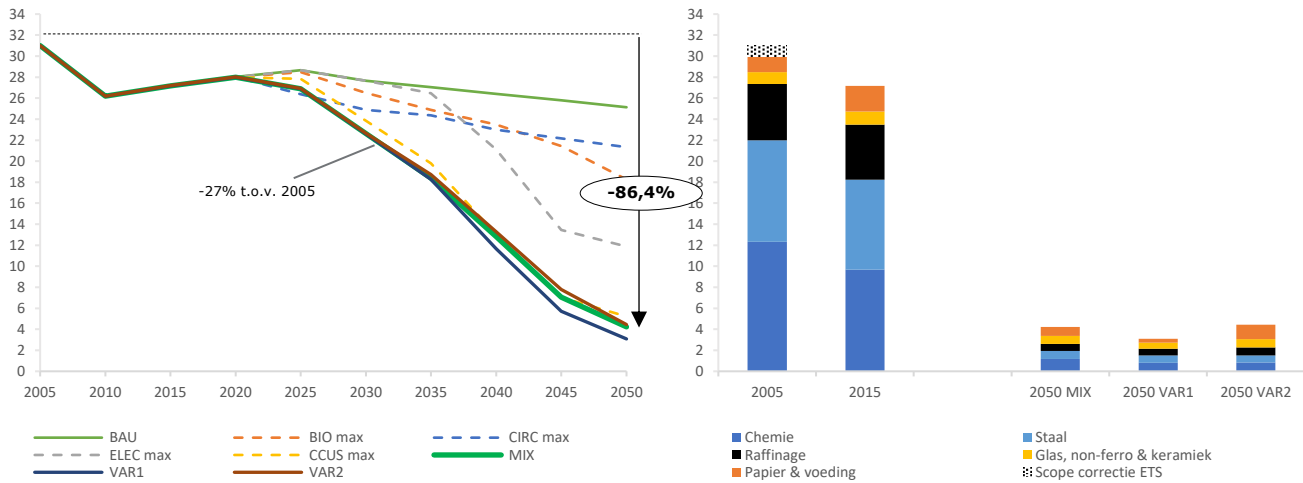
In de gecombineerde verkenningsscenario's kan de inzet van een combinatie van innovatieve technologieën leiden tot **tussen de 86 en 90% broeikasgasreducties** in 2050 (t.o.v. 2005) en dit bij een stijgende productie van de onderzochte sectoren met 3% tegen 2050. Er wordt hierbij rekening gehouden met de reeds aangekondigde investeringen en verwachte toekomstige productiestijgingen.

De grootste bijdrage aan emissiereducties tegen 2050 wordt geleverd door de chemiesector (-90% tot -95% t.o.v. 2005) en de staalindustrie (-92% tot -94% t.o.v. 2005), die ook het grootste aandeel hebben in de huidige emissies, gevolgd door raffinaderijen (-86% tot -88% t.o.v. 2005). CO₂-afvang speelt in elk van deze sectoren en in elk verkenningsscenario een belangrijke rol voor het behalen van deze reducties, naast de inzet op efficiëntieverbeteringen, overschakelingen op alternatieve energiedragers en feedstocks en de ambitieuze inzet op nieuwe, innovatieve productieprocessen.

De reducties in overige sectoren die in het onderzoek zijn meegenomen (voeding, papier, keramiek, non-ferro en glas) zijn beperkter¹¹, omdat verwacht wordt dat voor deze sectoren fossiele brandstoffen slechts gedeeltelijk worden uitgefaseerd, het toepassen van CO₂-afvang en het opschalen van sommige innovatieve technologieën moeilijker is en/of omdat de bedrijven niet in een cluster gelegen zijn waardoor schaalvoordelen minder kunnen spelen en er minder potentieel zal zijn om aan te sluiten op nieuwe netwerken. Voor deze sectoren is er nog wel potentieel om emissies te reduceren door de restwarmte te hergebruiken tussen bedrijven onderling en voor particulier gebruik. Dit potentieel is echter niet meegenomen in de modellering. Indien men voor de Vlaamse industrie verder dan 85% tot 90% emissiereducties wil gaan, ligt de uitdaging vooral in het verder uitfaseren van fossiele brandstoffen in kleinere sectoren en toch te blijven voorzien in de grote warmtebehoefte.

¹⁰ In elk van de gecombineerde verkenningsscenario's wordt CO₂ afvang ingezet als sluitstuk: na toepassing van de overige transitiepaden wordt CO₂-afvang toegepast op grote stromen resterende fossiele emissies in de grote clusters. Daarbij werd voor de drie scenario's uitgegaan van een gelijkaardige 'afvanggraad' (= relatieve aandeel van de resterende emissies die worden afgevangen) per technologie. Deze 'afvanggraad' per technologie werd bepaald op basis van de ligging van bepaalde sectoren en wat volgens wetenschappelijke literatuur haalbaar is afhankelijk van de CO₂-concentratie in de uitstoot.

¹¹ -38 tot -84% t.o.v. 2005 voor voeding en papier die voornamelijk lage temperatuurwarmte verbruiken, en -44 tot -59% voor keramiek, non-ferro en glas die voornamelijk hoge temperatuurwarmte verbruiken.



Figuur 4 Totale emissiereducties in de verschillende scenario's (links) en voor de verschillende sectoren onder de gecombineerde scenario's (rechts). Emissies in Mton CO₂eq.¹².

Tot en met 2035 worden de emissiereducties voornamelijk gerealiseerd door middel van procesoptimalisatie (efficiëntieverbeteringen), beperkte fuel switches en de inzet van CO₂-afvang voor hoge concentratie CO₂-processen, zijnde waterstof en ammoniakproductie. Belangrijk is dat tijdens deze periode ook de nodige infrastructuur wordt gerealiseerd en de logistieke ketens worden uitgebouwd om dit te faciliteren.

Vanaf 2035 worden deze technologieën aangevuld met de ambitieuze uitrol van nieuwe innovatieve productietechnologieën en de inzet van CO₂ afvang bij grote puntbronnen met lage concentratie CO₂. Hiervoor is nood aan basisonderzoek dat de klimaat en economische relevantie significant moet verhogen, Onderzoek dat vandaag moet starten en op termijn naar maturiteit en bedrijfsadoptie moet worden gebracht. Dit is wat in Vlaanderen in het Moonshot innovatieprogramma beoogd wordt.

Er bestaat nog veel onzekerheid over de termijn van implementatie. Deze jaartallen zijn louter een inschatting, gebaseerd op literatuuronderzoek en expertgesprekken en dienen opgevolgd te worden in functie van nieuwe economische en technologische ontwikkelingen.

OPMERKING: Wanneer er gekeken wordt naar de broeikasgasreducties, zal in dit rapport 2005 als referentiejaar worden gebruikt (i.p.v. 1990). Dit omdat er pas vanaf 2005 data beschikbaar is die de ETS en niet-ETS-sectoren splitst en omdat er voor 1990 ook geen publiek toegankelijke data beschikbaar is inzake het verbruik van siderurgische gassen in de elektriciteitssector. Deze gassen worden in deze studie onder de emissies van de staalsector aangerekend. Voor de overige data (bijv. energieverbruik, carbon capture toepassing, feedstock-noden) zal 2015 als referentiejaar worden gebruikt.

¹² N.B. 2005 is gebaseerd op gerapporteerde ETS cijfers aangevuld met cijfers voor de scope correctie tussen 2005 en 2013 zoals opgenomen in het Voortgangsrapport 2016-2017 van het Vlaams Klimaatplan 2013-2020. Cijfers voor 2010 is een benadering o.b.v. gerapporteerde ETS cijfers in combinatie met de Vlaamse broeikasgasinventaris, maar het was niet mogelijk om hier een exact cijfers o.b.v. correcte scope te berekenen.

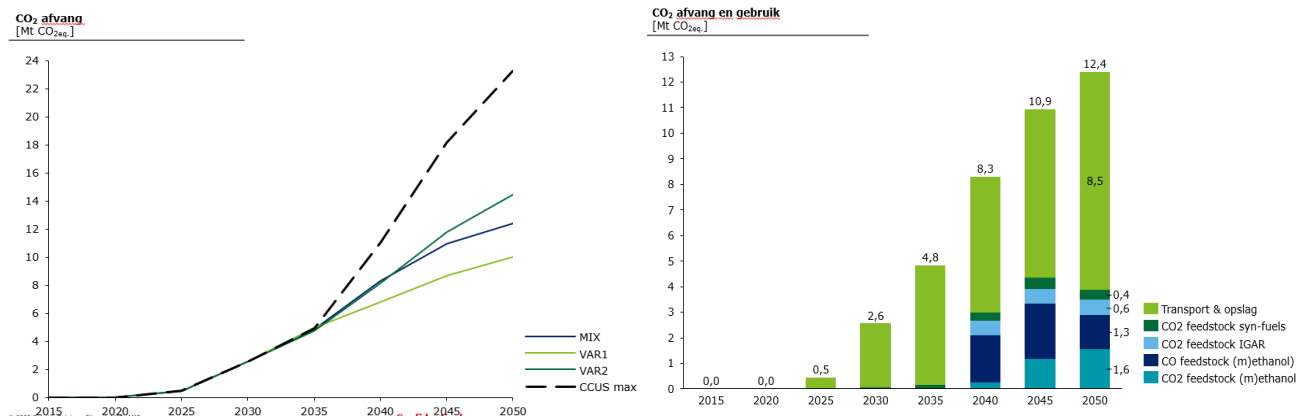
Technologiemix

De technologiemix van de toekomst zal in grote mate bepaald worden door de evolutie van technologische ontwikkeling, de evolutie van de marktprijzen en in welke mate het flankerend beleid de commerciële implementatie ervan zal faciliteren.

Toch zien we over de scenario's heen een aantal algemene trends:

- **CO₂-afvang** is in elk van de scenario's een belangrijk sluitstuk om significante emissiereducties te verwezenlijken (van 10 Mton CO_{2eq.}/jaar onder Var1 tot 14 Mton CO_{2eq.}/jaar onder Var2 in 2050, Dit komt overeen met 40% tot 55% van de 2050 emissies onder BAU). Dit is onder meer ingegeven omdat in sommige processen CO₂ emissies moeilijk te vermijden zijn en geen te grote disrupties voor bestaande waardeketens te veroorzaken. Sommige nieuwe productietechnologieën kunnen, indien deze sneller ingang vinden of goedkoper zijn, de nood aan CO₂ afvang verminderen.
- **CCUS**: de afgevangen CO₂ kan ofwel gebruikt worden als feedstock (CCU), ofwel kan deze getransporteerd en geologisch opgeslagen worden (CCS). Een belangrijke piste voor de valorisatie van CO₂ is de productie van nieuwe platformmoleculen ethanol en methanol. Deze toepassingen vereisen evenwel de beschikbaarheid van grote hoeveelheden H₂. Over alle scenario's heen blijft transport van CO₂ (voor opslag of gebruik buiten de Vlaamse industrie) belangrijk: minimum 8 Mton CO_{2eq.}/jaar in 2050.
- **Circulariteit**: er wordt van uitgegaan dat circulaire technologieën onder alle mogelijke scenario's een belangrijke rol zullen blijven spelen, omwille van de druk vanuit materialen- en afvalbeleid en een maatschappelijke druk. Hier zien we voornamelijk potentieel voor de inzet van Kunststofafval voor recyclage (eerst mechanisch, dan chemisch) en ter gedeeltelijke vervanging van steenkool voor staalproductie (via IGAR-technologie)¹³.
- **Elektrificatie van warmte en processen**: zal een belangrijke rol spelen. In elk van de verkenningsscenario's zal de vraag naar elektriciteit sterk stijgen en verdubbelen.
- **Waterstof**: Daarnaast is de inzet van H₂ als feedstock (of in mindere mate als brandstof bij processen die hoge temperatuur nodig hebben) ook een belangrijke piste om koolstof te valoriseren. De grote stijgende vraag zal voornamelijk geconcentreerd zijn in de 3 industriële clusters. O.a. de import- en transportinfrastructuur moeten hierop worden voorbereid. De mate van inzet van deze piste is evenwel ook sterk afhankelijk van de beschikbaarheid en de marktprijs van elektriciteit en technologische ontwikkelingen zoals hogere efficiëntiewinsten en opslag.
- **Biomassa** zal ook een rol spelen in de transitie. Biomassa kan in combinatie met CO₂-afvang tot negatieve emissies leiden. De mate van inzet van deze piste is evenwel sterk afhankelijk van de beschikbaarheid en de marktprijs van biomassa. De logistieke ketens moeten hierop voorbereid worden, inclusief de importmogelijkheden. De inzet van biomassa verlaagt de nood aan CO₂-afvang.
-

¹³ We zetten voor staal in op een nieuwe technologie, zijnde plasma-gassificatie die instaat voor de productie van syngas



Figuur 5 Resultaten voor de hoeveelheid CO₂ afvang (Mton CO₂eq.) in het MIX, Var1, Var2 en CCUS max en hoeveelheid CO₂ afvang en gebruik in het MIX verkenningsscenario (rechts).

Overzicht per sector:

De reducties in de sectoren chemie, raffinage en staal kunnen hoofdzakelijk gerealiseerd worden door:

- **Chemie:** de belangrijkste bron van emissies in de chemiesector is de **productie van High Value Chemicals¹⁴ (HVC's)**. Voor wat betreft de nieuwe investeringen die gepland in de nabije toekomst (ethaanstoomkraker en PDH-units), is er vertrokken vanuit de hypothese dat deze ook in 2050 nog operationeel zullen zijn. Deze installaties maken gebruik van fossiele inputs. Ze zullen naar verwachting zeer efficiënt zijn, waardoor er naar de toekomst toe weinig potentieel is voor nog verdere verbeteringen. Voor deze installaties zal CO₂ afvang dus de voornaamste CO₂-reducties moeten realiseren. Onder impuls van het materialen- en afvalbeleid is het verder te verwachten dat er een dalende vraag aan "virgin" kunststof zal ontstaan (door mechanische recycling en efficiënter gebruik van materialen en afgeleide producten) en een vervanging van een deel van de productie (tot 20%) door chemische recycling (met ook hier toepassing van CO₂ afvang) om verdere CO₂-emissiereducties te realiseren. Voor het overige deel van de sector zijn er verschillende opties mogelijk:
 - Behoud van bestaande technologie (nafta stoomkraken) met toepassing van CO₂-afvang.
 - Behoud van bestaande feedstock (nafta) met elektrificatie van het proces (schokgolf reactor).
 - Overschakeling naar nieuwe platformmoleculen zoals ethanol en methanol, die omgezet kunnen worden naar HVC's. Er is hiervoor wel flexibiliteit in hoe deze worden geproduceerd, namelijk via CCU (CO₂ + H₂), op basis van syngas (vb. hoogovengas) en op basis van biomassa. Hierdoor ontstaat een (gedeeltelijke) ontkoppeling voor nafta tussen de chemie en de petro-raffinage, maar biedt anderzijds de opportuniteit voor valorisatie van CO₂ en hoogovengassen uit de staalsector.

Daarnaast is ook de **productie van waterstof** een belangrijke bron van emissies in de chemiesector. Er wordt vastgesteld dat er een

¹⁴ High Value Chemicals omvatten onder andere butadiëen, benzeen, toluëen, xyleen, ethyleen, propyleen.

sterke stijging van de **vraag naar H₂** wordt verwacht¹⁵. Er bestaan verschillende opties om de productie van H₂ CO₂-vrij te maken, zijnde gebruik van bestaande technologieën in combinatie met CO₂ afvang (blauwe H₂), via elektrolyse (groene H₂ in de veronderstelling dat elektriciteit klimaatneutraal is) of via methaanpyrolyse (turquoise H₂). De uiteindelijke technologiemix zal hier sterk afhangen van de prijzen van respectievelijk aardgas en elektriciteit. De nood aan **CO₂-afvang in de chemiesector** voor het realiseren van verdere CO₂-reducties is sterk afhankelijk van de technologiemix in 2050. Onder het scenario Var1 – met hoge elektrificatie – is deze beperkt tot 2,7 Mton CO_{2eq.} in 2050. Onder het scenario Var2 – met hoge mate van behoud van bestaande technologieën – is dit meer dan dubbel zo hoog (5,9 Mton CO_{2eq.} afvang/jaar in 2050).

- **Raffinage:** significante emissiereducties worden hier hoofdzakelijk gerealiseerd door toepassing van CO₂-afvang. Van de 3,5 Mton CO_{2eq.} reductie tegen 2050 wordt 2,5 tot 3 Mton CO_{2eq.} door middel van CO₂-afvang verwezenlijkt. De afhankelijkheid van CO₂-afvang in deze sector kan beperkt verminderd worden door warmte te elektrificeren (tot 20%), de elektriciteitsbehoefte in te vullen met elektriciteit van het net in plaats van eigen productie in WKK's of het aardgasverbruik deels te vervangen met bio- of syn-brandstoffen. Ook hier is er een belangrijke nood aan klimaatneutrale energiedragers.
- **Staal:** Voor de realisatie van primair staal zijn er 2 mogelijke pistes om significante emissiereducties te realiseren. Ofwel een verderzetting van de bestaande technologie (op basis van cokes) met inzet van CO₂-afvang, aangevuld met een gedeeltelijke shift in inputs waarbij steenkool gedeeltelijk (tot 45%) wordt vervangen door een combinatie van (plastic)afval (IGAR-technologie), bio-steenkool (torrefactie) en rechtstreekse bijmenging van H₂. Ofwel door toepassing van een volledig nieuw proces op basis van H₂ (H₂-DRI). In de verkenningsscenario's is uitgegaan van de eerste optie die in lijn is met de huidige roadmap van de staalindustrie in Vlaanderen. De tweede optie is een mogelijkheid, maar sterk voorwaardelijk aan de beschikbaarheid van voldoende en betaalbare groene H₂. In het verkenningsscenario kan 7 Mton CO_{2eq.} emissiereductie gerealiseerd worden (t.o.v. van BAU), waarvan 4,5 tot 5,5 Mton via CO₂-afvang (inclusief hoogovengassen die kunnen worden gebruikt als input voor ethanol/methanol productie). Ook hier is er een belangrijke nood aan klimaatneutrale energiedragers.
- **Overige industrieën:** voor de kleinere sectoren (voeding, papier, glas, non-ferro en keramiek) bestaat de uitdaging er voornamelijk in om de warmtebehoefte zo veel als mogelijk fossiel-vrij in te vullen. Grote mate van CO₂-afvang is hier immers een weinig haalbare optie, doordat de meeste bedrijven niet in grote clusters liggen en er een grote spreiding is van kleinere emissiebronnen. Het is weinig efficiënt om voor deze meer afgelegen bedrijven een CO₂-netwerk of H₂-netwerk aan te leggen. Voor lagere temperatuurwarmte (voeding en papier) kan elektrificatie van warmte een belangrijke bijdrage leveren tot CO₂-reducties. Voor hogere temperatuurwarmte (glas, keramiek, non-ferro) is elektrificatie op dit moment een nog minder ontwikkelde optie, waardoor voornamelijk ingezet zal worden op bio- en syn-

¹⁵ Zowel binnen de chemiesector (feedstock voor vb. ethanol/methanol en ammoniak, ...) als daarbuiten (inzet in hoogovens in de staalsector of als input voor de productie van syn-brandstoffen) of rechtstreeks als energiedrager.

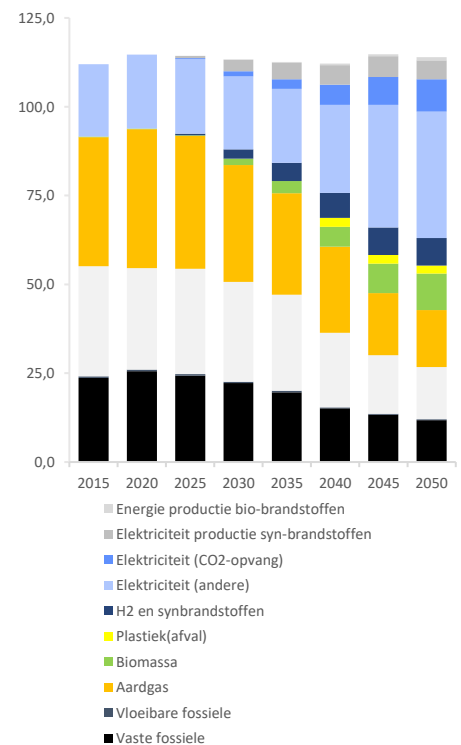
brandstoffen. Er is alleszins nog een belangrijk technologisch vraagstuk om deze hoge temperatuurwarmtevraag in te vullen. Voor de bedrijven die wel meer in een cluster gelegen zijn moeten de mogelijkheden bekeken worden om netwerken uit te breiden naar nabijgelegen bedrijven.

De transitie naar koolstofcirculaire en CO₂-arme technologieën leidt tot een iets lagere energie- en feedstockvraag, maar vooral tot een belangrijke verschuiving in de energie- en feedstockmix

In elk van de gecombineerde scenario's is er **een lichte daling van de finale energievraag** tussen 2015 en 2050 (van -3,8% tot -7,9%¹⁶). Enerzijds leiden een relatief stabiele productie in combinatie met algemene efficiëntieverbeteringen en de inzet van nieuwe, efficiëntere productietechnologieën (vb. schokgolfreactor) tot een algemene daling van de energievraag¹⁷. Anderzijds leidt de inzet van CO₂-afvang technologie tot een stijgende vraag. Beide trends heffen elkaar grotendeels op.

Meer dan een stijging of daling van het energieverbruik, verwachten we onder elk van de gecombineerde verkenningsscenario's **een sterke wijziging van de energiemix**:

- Het **elektriciteitsverbruik**¹⁸ **stijgt sterk, van +50% tot +300%** in 2050. Dit is ten dele het gevolg van de assumptie dat CO₂-afvang zal gebeuren via elektriciteit.
- Daarnaast stijgt de inzet van **H₂ en syn-brandstoffen voor energiedoeleinden** van 6 tot 8 TWh in 2050¹⁹. Deze stijging is deels te verklaren voor de opwekking van hoge temperatuurwarmte waar directe elektrificatie moeilijker is.



Figuur 6 De evolutie energievraag (finaal + energie voor productie van bio- en syn-brandstoffen) onder het centraal verkenningsscenario (MIX) (in TWh).

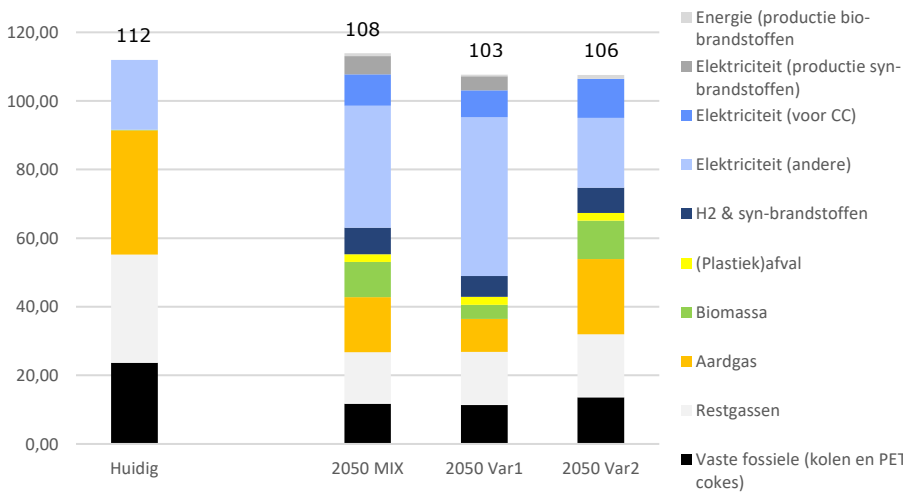
¹⁶ Inclusief het totale verbruik van bio- en syn-brandstoffen. Deze bio- en syn-brandstoffen worden in de modelering deels geïmporteerd, deels geproduceerd in Vlaanderen. Het energieverbruik voor de productie binnen Vlaanderen is niet meegenomen voor de berekening van het finale energieverbruik, maar is voor de volledigheid wel opgenomen in figuur 6 onder de categorieën "electriciteit (productie syn-brandstof)" en "energie productie bio-brandstof")

¹⁷ Voor de meeste sectoren werd uitgegaan van een jaarlijkse verbetering van 0,8%/jaar in lijn met historische trends. Door deze jaarlijkse verbetering in combinatie met een beperkte productiegroei (+3% tussen 2015 en 2050 over alle sectoren heen) daalt de totale energievraag.

¹⁸ Veel van het huidige aardgasverbruik wordt momenteel ingezet in WKK's voor zowel elektriciteits- als warmteproductie. Telkens als er in dit rapport wordt verwezen naar elektriciteitsconsumptie heeft dit enkel betrekking op elektriciteitsafname van het net (hoeveel zelfgeproduceerde elektriciteit er wordt geconsumeerd is niet publiek beschikbaar). Het aardgasverbruik in WKK's is meegenomen als algemeen aardgasverbruik in het model, en kan worden vervangen door bio-methaan en syn-gas (die eveneens kunnen ingezet worden in WKK's), ofwel door elektriciteit (wat rechtstreekse afname van het net impliceert i.p.v. eigenproductie in WKK's).

¹⁹ Inclusief H₂ in de hoogovens van de staalindustrie. Figuur 6 geeft enkel de syn-brandstoffen weer die worden geïmporteerd. Voor de syn-brandstoffen die hier worden

- De **vraag naar biomassa voor energiedoeleinden in de industrie stijgt** met 75% tot 500%²⁰. Het merendeel hiervan heeft betrekking op valorisatie van reststromen bij processen die biomassa voornamelijk als feedstock gebruiken. De grote bepalende factor voor de uiteindelijke vraag onder de verschillende scenario's ligt bij de kleinere sectoren: indien er voor laagtemperatuurwarmte wordt ingezet op een hoge mate van elektrificatie, dan is er minder nood aan biomassa om de CO₂ reducties te verwezenlijken.
- **(Kunststof) afval wordt maximaal ingezet als circulaire feedstock.** Daarnaast is er gebruik van kunststofafval (2,3 TWh) voor energetische doeleinden zoals weergegeven in Figuur 7 en dit heeft betrekking op de inzet van afval voor de productie van primair staal (via de IGAR-technologie). Via plasma gassificatie wordt kunststofafval omgezet in syngas (CO+H₂), dat vervolgens wordt ingezet in de hoogovens. Dit syngas levert energie en treedt tegelijkertijd op als reductiemiddel..

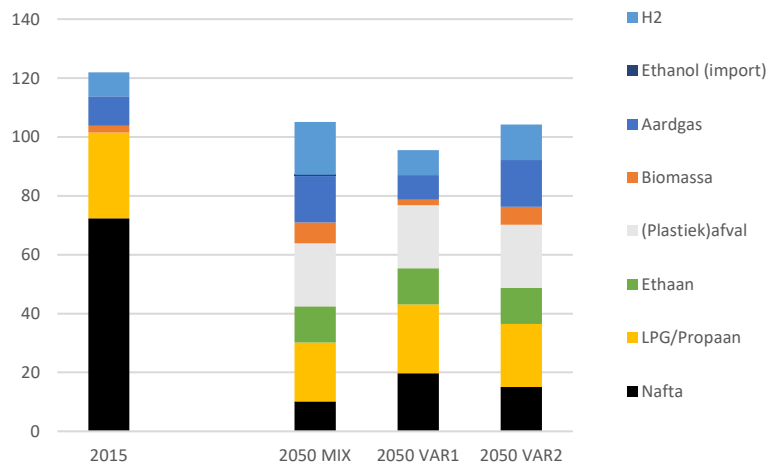


Figuur 7 Evolutie energieverbruik (finaal + energie voor productie van syn- en bio-brandstoffen) per drager (exclusief feedstocks) in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in TWh). De totalen bovenaan geven enkel het finaal energieverbruik weer (excl. Energie voor productie van bio- en syn-brandstoffen)

In elk van de gecombineerde verkenningsscenario's is er **een daling van de feedstockvraag (van -14% tot -22%)** en zien we afhankelijk van de sectoren een **sterke verandering in de feedstockmix**. Dit is met name het geval bij de chemiesector, waar nafta wordt vervangen door de inzet van kunststofafval, biomassa en de platformmoleculen ethanol en methanol. De mate waarin deze wijziging in feedstock plaats zal vinden, is afhankelijk van de beschikbaarheid en prijs van de verschillende feedstocktypes.

geproduceerd werd er van uitgegaan dat de benodigde H₂ hiervoor met elektriciteit wordt geproduceerd (dit enkel voor modeltechnische redenen, andere productiemogelijkheden van H₂ zijn in de toekomst ook mogelijk). Het verbruik van eigen geproduceerde syn-brandstoffen wordt dan ook niet niet weergegeven om dubbelstellingen met het elektriciteitsverbruik te vermijden.

²⁰ Figuur 6 voorziet geen biomassaverbruik in 2015-2025. Dit komt omdat het huidige biomassaverbruik zich voornamelijk situeert binnen de papier- en voedingssector, en deze sectoren op vereenvoudigde wijze zijn meegenomen in de modellering (warmteopwekking in boilers met behulp van aardgas, die na 2025 gedeeltelijk overschakelen op bio-methaan).



Figuur 8 Evolutie feedstockverbruik per drager in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in TWh)²¹

Indien we de energie- en feedstockvraag samen bekijken, dan zien we de vraag van zowel biomassa, H₂ als kunststofafval onder alle scenario's stijgen:

- Het verbruik van biomassa stijgt sterk tot meer dan drie keer het huidige verbruik.
- Daarnaast stijgt de inzet van **H₂ en syn-brandstoffen** sterk tot meer dan drie keer het huidige verbruik.
- De inzet van **kunststofafval** is voornamelijk belangrijk als inzet voor chemische recyclage²². In het totaal (energie + feedstock) stijgt de vraag naar kunststofafval tussen 2 en 2,5 Mton per jaar in 2050.



Figuur 9 Evolutie van totaalverbruik H₂, biomassa en kunststofafval (energie + feedstock) in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in TWh)

De sterk veranderende feedstockmix toont aan dat er o.a. een sterke nood is aan het snel opzetten en uitbouwen van de infrastructuur (zowel import als transport) en de logistieke ketens om dit te verwezenlijken. De keuze van de industrie om over te schakelen zal in sterke mate bepaald worden door de

²¹ Exclusief de input van ruwe aardolie in de raffinagesector.

²² Ongeveer 10% van de 23,7 TWh wordt ingezet bij staal, de rest voor chemische recyclage.

beschikbaarheid van competitieve feedstock (en energie) en infrastructuur is hiervoor een noodzakelijke voorwaarde.

De transitie zal een grote financiële inspanning vergen. Hiertegenover staat het vermijden van hoge CO₂-kosten en het vrijwaren van onze industriële toegevoegde waarde.

De transitie zal leiden tot **hoge investeringsnoden** voor zowel de overheid als private ondernemingen in de Vlaamse industrie. Het totale kostenplaatje kan in het kader van deze studie niet worden ingeschat, enerzijds door een gebrek aan data, maar tevens omdat de scope van deze opdracht maar een beperkt deel van de transitie afdekt.

De verschillende componenten van investeringsnoden zijn als volgt:

- Investeringsnoden in de energieproductie en het energiesysteem (buiten de scope van onze opdracht - niet berekend, maar de verwachting is wel dat dit aanzienlijk zal zijn).²³ Dit is wel onrechtstreeks opgenomen in de OPEX inschattingen via de elektriciteitsprijs (die stijgt omwille van de assumptie dat de investeringen in het elektriciteitssysteem integraal worden doorgerekend).
- Uitrol van nieuwe productietechnologieën (inschatting gemaakt).
- Kosten voor CO₂ afvang (inschatting gemaakt).
- Investeringsnoden om het huidige productiepark op peil te houden tot en met 2050 (onderhoud en renovatie/vervanging van huidige productiepark)²⁴ (niet berekend wegens gebrek aan data).
- Investeringsnoden voor (publieke) infrastructuur, waaronder transportnetwerken voor H₂ en CO₂-transport, opslag van CO₂ en importnetwerken (niet berekend daar dit sterk afhankelijk is van de dimensionering van deze infrastructuur en zeer tracé-afhankelijk).

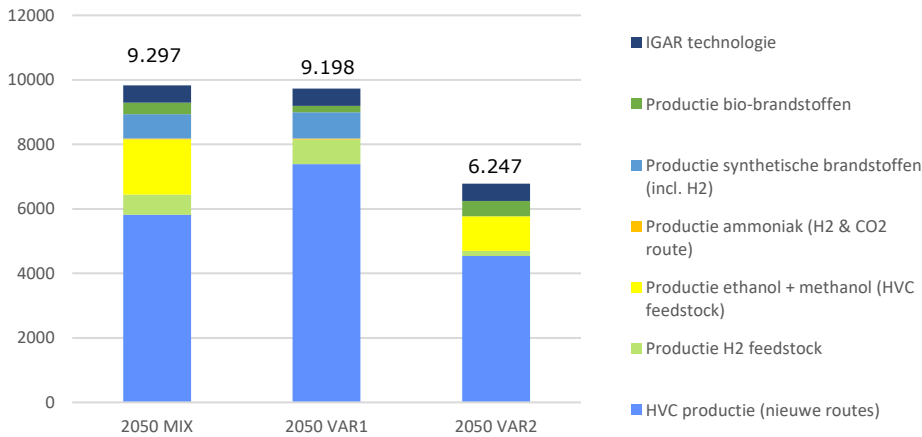
Voor wat het aandeel van vereiste investeringen (CAPEX) voor de implementatie van de gekozen klimaatneutrale technologieën betreft, worden deze voor de in deze studie onderzochte sectoren ingeschat tussen €12 en 18 miljard²⁵ tussen nu en 2050, waarvan tussen €6 tot 9 miljard in de toepassing van nieuwe productietechnologieën en €2 tot 7,5 miljard voor CO₂-afvang (excl. transport en opslag)²⁶.

²³ De VNCI 'Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050' van Ecofys en Berenschot (2018) schat in dat van € 63 miljard voor de transitie van de Nederlandse chemische industrie, meer dan de helft (€ 37 miljard) in de energiesector zit.

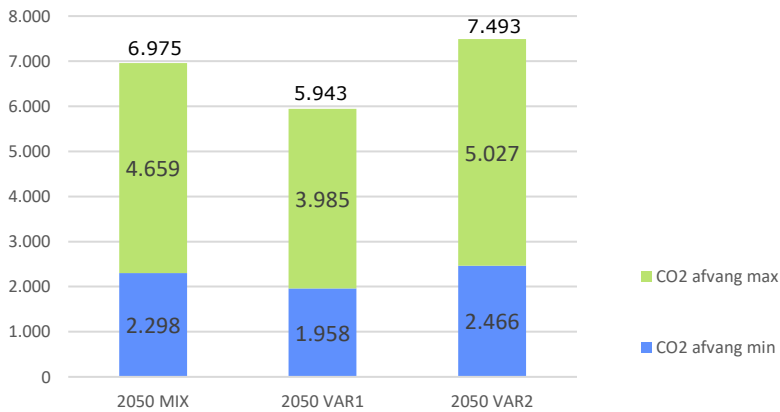
²⁴ Omdat er onvoldoende info beschikbaar is over de vereiste investeringen hiervoor.

²⁵ Alle bedragen zijn uitgedrukt in €2015 – de bedragen zijn niet verdisconteerd.

²⁶ Deze brede range voor CO₂-afvang komt door zeer sterk uiteenlopende inschattingen in de geraadpleegde bronnen. Zie ook Appendix D.



Figuur 10 Totale CAPEX in nieuwe productietechnologieën in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in EUR2015 miljoen)



Figuur 11 Totale CAPEX in CO₂ afvangcapaciteit (exclusief transport & opslag) in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in EUR2015 miljoen)

De investeringsnoden (CAPEX) voor de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën onder de eerste variant (Var1) liggen op een gelijkaardig niveau als onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**). De hogere investeringen in elektrificatietechnologieën (+ €3 miljard t.o.v. **MIX**) worden gecompenseerd door lagere investeringen in andere technologieën en in het bijzonder de waardeketen voor HVC-productie o.b.v. ethanol en methanol (-€2,5 miljard t.o.v. **MIX**). Ook de benodigde investeringen in CO₂-afvang technologie liggen iets lager (+/- €300 tot €650 miljoen).

Voor de tweede variant (Var2) liggen de investeringsnoden in nieuwe productiecapaciteit significant lager dan onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**) (-€3 miljard). In werkelijkheid zou de kloof wellicht kleiner zijn, gezien ook het behoud van bestaande productie-installaties bepaalde investeringen vergt voor onderhoud en refurbishment. Anderzijds liggen de investeringskosten voor CO₂ afvangcapaciteit hoger en zullen ook de kosten voor CO₂ transport en opslag hoger liggen.

Bovenstaande cijfers zijn **geen** weergave van de additionele investeringen t.o.v. het BAU scenario. Door in te zetten op nieuwe productiecapaciteit, zullen bepaalde investeringen voor het onderhoud en de refurbishment van bestaande installaties onder 'business-as-usual' vermeden worden onder de

verkenningsscenario's en deze vermeden investeringen worden niet mee in rekening gebracht.

Daar bovenop zouden de **jaarlijkse energie- en feedstockkosten** toenemen onder het centrale verkenningsscenario, met ongeveer +64% (ongeveer €3 miljard) in 2050²⁷. Deze stijging doet zich echter ook voor onder BAU, door de verwachte prijsstijging voor ruwe aardolie en zijn afgeleide producten (voornamelijk nafta) zoals verwacht door het Internationaal Energieagentschap. De kosten stijgen enigszins minder sterk onder de twee varianten, waar er werd uitgegaan van minder sterke prijsstijgingen voor bepaalde energiedragers en een technologiekeuze in functie van deze prijzen.

De **emissiekosten**²⁸ - die in 2018 ongeveer € 650 miljoen bedroegen) zouden ondanks sterke reducties alsnog stijgen, tussen €750 miljoen (+15%, onderVar1) tot €1,25 miljard (een verdubbeling onder MIX en Var2) in 2050. Dit komt omwille van een hoge veronderstelde CO₂ prijs van 300 euro/ton CO₂ in 2050²⁹. Zonder reductiemaatregelen zouden de emissiekosten onder het **BAU**-scenario meer dan vertienvoudigen, tot bijna €7,5 miljard/jaar in 2050. Hieruit wordt duidelijk dat 'Business as Usual' geen haalbare optie is onder een sterke stijging van de koolstofprijs.

De verkenningsscenario's tonen aan dat significante reducties mogelijk zijn, maar dat de uiteindelijke technologiemix zal bepaald worden door onder meer de energieprijzen, de marktrijpheid van innovatieve technologieën, de business case, de internationale context en beleidskeuzes die dit alles zullen flankeren.

Op een termijn van 30 jaar zijn de onzekerheden inzake de evoluties van energieprijzen (en technologieprijzen) echter te groot om een zinvolle inschatting te maken van welke technologiemix het meest kostenefficiënt is. Net daarom is het belangrijk om voldoende flexibiliteit te voorzien in de Vlaamse industriële roadmap en geen enkele beloftevolle technologie bij voorbaat uit te sluiten.

Verder zien we over de verschillende verkenningsscenario's heen een aantal gemeenschappelijke randvoorwaarden waarop we het komende decennium moeten inzetten, zoals hieronder beschreven.

Randvoorwaarden en uitdagingen voor het verwezenlijken van belangrijke reducties

Om de transitie te verwezenlijken en de bijhorende emissiereducties te realiseren is er een belangrijke rol weggelegd voor het beleid, vnl. op Europees maar ook op Vlaams niveau. Enerzijds zal er een **voldoende prikkel** nodig zijn opdat de industrie zou (kunnen) investeren in CO₂-reducerende technologieën, anderzijds dient er over gewaakt te worden dat de competitiviteit van de Vlaamse (en bij uitbreiding Europese) industrie gevrijwaard wordt door te voorzien in **een level playing field** tussen

²⁷ Exclusief de import van ruwe olie. Voor wat betreft nafta en LPG wordt enkel de kost van import (verschil tussen vraag vanuit chemie en aanbod vanuit de Vlaamse raffinaderijen) in rekening genomen. Vanaf 2040 zou het aanbod aan nafta uit de raffinaderijen hoger liggen dan de vraag vanuit de chemie: de opbrengst van een eventuele export van deze nafta is niet mee in rekening genomen.

²⁸ Hierbij wordt geen rekening gehouden met huidige en toekomstige compenserende maatregelen, zoals bijv. de kosteloze toewijzing van emissierechten.

²⁹ €300/ton in 2050, de gemiddelde waarde van de lange termijn scenario's van de Europese Commissie.

Europese en niet-Europese bedrijven. Deze laatsten zijn vaak niet gebonden door een ETS-systeem en dienen geen bijhorende CO₂-kosten te betalen wat hen een voordeel geeft in een geglobaliseerde markt van import en export.

Er zijn een aantal belangrijke randvoorwaarden en uitdagingen aan het realiseren van de transitie, die hierna worden opgelijst. Anderzijds biedt de transitie ook mogelijke nieuwe opportuniteiten voor Vlaanderen door in te zetten op de ontwikkeling van nieuwe technologieën die achteraf ook kunnen geëxporteerd worden en Vlaanderen kunnen positioneren als een innovatieleider in de klimaattransitie maar ook het versterken van de reeds efficiënte en goedwerkende industrie wat kan leiden tot een nog sterkere verankering en een aanzuigeffect.

We verwijzen ook naar leverbaarheid 8 m.b.t. het 'Flankerend beleid' waarin voorgestelde beleidsmaatregelen zijn opgenomen om de transitie te faciliteren.

Ontwikkeling en opschaling van koolstofcirculaire en CO₂-arme technologieën en het ondersteunen van commerciële implementatie ervan

De onderzochte technologieën die worden toegepast in de verkenningsscenario's zijn vandaag ofwel nog niet ontwikkeld, ofwel in een vroeg stadium van ontwikkeling of zijn technologisch volledig ontwikkeld maar voornamelijk niet rendabel om op commerciële schaal te implementeren.

Om belangrijke reducties tegen 2050 te verwezenlijken **moeten nieuwe technologieën ontwikkeld worden (zoals onder meer voorzien in het Moonshot innovatieprogramma) en moeten technologieën met lagere TRL's verder ontwikkeld worden** om ze op te schalen en doorbraken te realiseren door het stimuleren van innovatie en onderzoek. Een belangrijk aspect van deze ontwikkeling betreft ook het commercieel aantrekkelijk maken van deze technologieën door in te zetten op hogere efficiëntiewinsten. Aanvullend zou kunnen worden onderzocht hoe kostenreductie door het gebruik van bijvoorbeeld goedkopere materialen kan gerealiseerd worden.

Daarnaast zijn er reeds enkele CO₂-reducerende technologieën momenteel beschikbaar die **technologisch klaar zijn om uitgerold te worden op grote schaal, maar waarvan de business case (nog) niet positief is** en ze geen bijkomende toegevoegde waarde leveren t.o.v. bestaande technologieën. Hier is een belangrijke rol weggelegd voor het beleid om dit te faciliteren door o.a. tijdelijk te voorzien in CAPEX- en/of OPEX-ondersteuning, maar ook het ter beschikking stellen van de nodige infrastructuur, en het bekijken van het wetgevend kader. Bovendien is er ook voor deze technologieën nog een belangrijke rol voor onderzoek en innovatie door in te zetten op het commerciële aspect zoals efficiëntiewinsten.

De verkenningsscenario's voorzien een zeer ambitieuze uitrol op een tijdspanne van 15 jaar (2035-2050) om in 2050 belangrijke reducties te verwezenlijken. Dit is veel sneller dan de gangbare uitrol van nieuwe technologieën, wat voor de industrie grote uitdagingen zal vergen niet alleen op het vlak van engineering, maar ook op het vlak van vergunningsprocedures, marktwerking, etc.

Deze timing is erg ambitieus en zal significante inspanningen vergen en dit zowel op het vlak van onderzoek en ontwikkeling, maar ook in het opzetten en ondersteunen van demonstratieprojecten. Er is nood aan verdere

technologische ontwikkeling, maar evenzeer opschaling en verbeteren/stimuleren van de business case van deze technologieën teneinde deze commercieel toepasbaar te maken. Anderzijds is dergelijke ambitieuze timing de enige manier om significante emissiereducties tegen 2050 te realiseren, zonder deze volledig te laten afhangen van CO₂-afvang. Om de opschaling van deze technologieën enerzijds en de industriële toepassing ervan anderzijds te versnellen, zullen inspanningen nodig zijn van alle betrokken stakeholders (overheid, bedrijven en onderzoekswereld), maar tevens zullen flankerende maatregelen van onder meer de overheid noodzakelijk zijn.

Een flankerend maar stabiel beleidskader om een *business case* voor klimaatvriendelijke investeringen te verzekeren en tegelijkertijd een level playing field te creëren

Onder de gesimuleerde scenario's wordt verwacht dat de productiekosten zullen stijgen t.o.v. vandaag, voornamelijk door een combinatie van een nood aan investeringen in nieuwe productietechnologieën, de toepassing van CO₂-afvang in bestaande installaties en de overschakeling op alternatieve, duurdere energiedragers en feedstocks. De investeringen voor industrieën om koolstofcirculair en CO₂-arm te worden, zijn dan ook anders van aard t.o.v. reguliere investeringen die vooral focussen om tot meer omzet te leiden of de kosten op lange termijn te dempen. Anderzijds is de verwachting dat de OPEX kosten onder het 'business-as-usual' scenario nog veel sterker zouden stijgen en dit door een sterke, veronderstelde stijging van de CO₂-prijs (tot €300/t CO_{2eq}. in 2050) die Europa zal hanteren om de transitie te sturen.

Europa zal door het hanteren van een voldoende hoge CO₂-prijs via het **ETS-systeem** (en/of andere sturende beleidsmaatregelen) **een sterk sturend beleid voeren om de industrie te laten omschakelen**. Vlaanderen schikt zich naar deze doelstellingen en de Vlaamse industrie zal hier dus ook mee geconfronteerd worden. Dit beleid zal ervoor zorgen dat de industrie gestuurd zal worden om te investeren in CO₂-reducerende technologieën om deze hoge CO₂-kosten te vermijden. Desalniettemin kennen deze technologieën vaak nog geen positieve business case omdat vb. de efficiëntiewinsten ervan lager liggen t.o.v. de huidige technologieën of omdat de nieuwe energie en feedstock nog niet voldoende beschikbaar is en aan een competitieve prijs. Dergelijke investeringen kennen ook een lange doorlooptijd vooraleer ze effectief operationeel zijn, wat leidt tot significante voorinvesteringen.

Daarnaast opereren en concurreren de Europese bedrijven in een globale context en dienen ze te concurreren met bedrijven die niet gebonden zijn door ETS-regels. Europa en Vlaanderen moet vermijden dat de industrie wegtrekt uit het continent om zich te vestigen in andere werelddelen waar ze minder gemonitord worden en vaak ook minder efficiënt opereren. Dit fenomeen, **carbon leakage**, betekent dat de emissies van Europa dan wel zullen dalen, maar op wereldniveau zelfs zullen toenemen. Daarnaast heeft dit directe grote gevolgen voor de welvaart in Europa en bij uitbreiding Vlaanderen, waar de basisindustrie een zeer belangrijke rol speelt. Europa en Vlaanderen moeten zorgen voor een **gelijkwaardig speelveld** (level playing field) voor importerende en exporterende bedrijven om de concurrentiepositie van EU-bedrijven te handhaven. Dit kan op verschillende manieren die verder onderzocht moeten worden (zie ook het document 'Flankerend Beleid').

Aanwezigheid van voldoende, leveringszekere en competitief geprijsde klimaatneutrale energiedragers en feedstocks is cruciaal om significante CO₂-reducties te realiseren

Om de transitie te kunnen waarmaken zal de industrie o.a. een omschakeling moeten maken naar andere energiedragers en feedstocks. Het is dan ook cruciaal dat het energiesysteem hierop wordt aangepast. De industrie heeft nood aan voldoende, betrouwbare en betaalbare klimaatneutrale energiedragers en feedstocks om de transitie te kunnen realiseren. Hierbij moet rekening gehouden worden met de vraag aan energie die de industrie nodig heeft om efficiëntie en veiligheid te kunnen garanderen. Deze uitdaging is des te groter indien men ook rekening houdt met de noden uit andere sectoren die ook voor een belangrijke transitie staan, maar buiten de scope van deze opdracht vallen (waaronder gebouwen, transport, etc.). Bovendien opereren de Vlaamse bedrijven in een concurrentiële globale context en zal **de beschikbaarheid, betrouwbaarheid en prijs** van energie en feedstock bepalend zijn voor de toekomstige keuzes die ze maken. Hierin zal zowel het voorzien in eigen productie als het verzekeren van voldoende invoer van belang zijn.

Uitbouw van infrastructuur en logistiek voor nieuwe waardeketens

Naast een wijziging in de energiemix zullen ook nieuwe vormen van feedstocks bijdragen aan significante CO₂-reducties. **De aanwezigheid van de nodige infrastructuur en logistiek voor deze nieuwe feedstocks en hun waardeketens is een noodzakelijke voorwaarde voor de transitie.** Zonder de aanwezigheid van deze infrastructuur en logistiek kan de industrie moeilijk grootschalige wijzingen doorvoeren omdat de beschikbaarheid van energie en feedstock cruciaal zijn.

Er dient infrastructuur (inclusief voor mogelijke sectorkoppeling) te worden uitgebouwd voor CCU/S, CO₂ & H₂ en de bestaande elektriciteitsinfrastructuur moet versterkt worden, vnl. in de industriële clusters. Voor de uitbouw van nieuwe infrastructuur dient er zowel gekeken te worden naar o.a. **transport** via pijpleidingen en via schepen. Er zal heel wat **import** gebeuren van energie en feedstock en dit aspect van infrastructuur dient ook bekeken te worden.

De logistieke ketens voor biomassa en hergebruik van kunststofafval dienen opgezet te worden en barrières hieromtrent dienen weggewerkt te worden. Ook de logistieke ketens voor waterstof/syn-brandstoffen dienen te worden uitgebouwd. Meer details zijn beschreven in het document 'Flankerend beleid'.

Ondersteuning voor de grootschalige toepassing van CO₂-afvang

In elk van de gecombineerde scenario's speelt **CO₂-afvang een sleutelrol** in het realiseren van significante reducties tegen 2050. Om dit in de praktijk te kunnen omzetten, is er nood aan voldoende infrastructuur voor transport naar geologische opslaglocaties buiten Vlaanderen (bij voorkeur onder de zeebodem), verdere verbetering van de efficiëntie van de afvangtechnologie en aan een voldoende draagvlak bij de bevolking voor de aanleg van transportinfrastructuur en/of opslag. Vlaanderen beschikt niet over (voldoende) locaties om CO₂ offshore permanent te stockeren. Er moeten dan ook strategische partnerships worden afgesloten met de buurlanden om te verzekeren dat Vlaanderen toegang krijgt tot deze stockagemogelijkheden en dat dit voor zeer lange termijn wordt verzekerd.

Bovenstaande elementen worden in meer detail besproken als aparte randvoorwaarden met bijbehorende suggesties voor beleidsaanbevelingen in Leverbaarheid 8 - 'Flankerend beleid'.

Opportunities die we kunnen benutten bij deze noodzakelijke transitie

Deze ambitieuze transitie brengt naast de nodige uitdagingen ook opportuniteiten met zich mee. Door adequaat in te zetten op deze transitie, kunnen we erin slagen om vruchten te plukken van onze inspanningen. Zo worden er vanuit de EU substantiële budgetten voorzien voor de industriële transitie en de ontwikkeling en toepassing van klimaatneutrale technologieën. Door nu mee te surfen op de ambities van de EU, kan Vlaanderen een deel van de ter beschikking gestelde middelen aanwenden voor deze transitie. Er kunnen als gevolg van de transitie en de gemaakte keuzes nieuwe waardenketens ontstaan, maar ook nieuwe exportmogelijkheden van baanbrekend onderzoek enerzijds of nieuw ontwikkelde producten en technologieën anderzijds. Zo is er een mogelijkheid om als Vlaanderen de chemische recyclage hub in de EU te worden en kunnen synergieën gezocht worden tussen circulariteit en de verwerking van afval. Dankzij de valorisatie van reststromen kunnen nieuwe sectorkoppelingen ontstaan. Diversificatie van energiedragers en feedstocks kan er tevens toe leiden dat we minder afhankelijk zijn van één dominante feedstock en zijn we weerbaarder tegen marktschokken ten gevolge van de transitie. Daarnaast is de Vlaamse basisindustrie gekend voor zijn zeer efficiënte werking en hoge mate van integratie. Het verder versterken van deze industrie zal zorgen voor een nog sterkere verankering ervan en de bijhorende welvaartscreatie, maar kan ook een significant aanzuigeffect kennen en bijhorende groei realiseren.

Roadmap naar 2050

Het realiseren van de ambitieuze CO₂-reducties zal gepaard gaan met uitbouwen van nieuwe infrastructuur en doorgedreven innovatie en is voorgesteld in een roadmap voor innovatie en infrastructuur

Het jaar 2050 lijkt nog veraf, maar is eigenlijk vlakbij indien er rekening wordt gehouden met de investeringscycli in de industrie. Er is dan ook nu actie vereist om de ambitieuze emissiereducties te behalen en de basisindustrie en bijbehorende welvaart in Vlaanderen te behouden en tegelijk te versterken en aan te passen voor de toekomst. Er is daartoe een roadmap opgesteld met vereiste acties per sector, verdeeld over drie decennia.

In **periode 2020-2030** en mede gelet op de langere doorlooptijd voor de opschaling van innovaties enerzijds en het voorzien van de nodige logistiek en infrastructuur anderzijds, wordt er aangeraden om maximaal in te zetten op:

- Verder stimuleren van basisonderzoek naar nieuwe en disruptieve technologieën om significante CO₂ reductie te realiseren binnen een economische realiteit, zoals de Vlaamse Regering voorziet binnen het Moonshot innovatieprogramma.
- Verdere procesoptimalisaties en efficiëntieverbetering van de huidige en nieuwe technologieën.
- Verder onderzoek, ontwikkeling en het realiseren van piloot-, demo- en indien mogelijk commerciële projecten van nieuwe technologieën (zoals CCUS met Antwerp@C en Carbon Connect Delta, biogebaseerde routes, elektrificatie en kunststof recycling voor staal);
- Het toepassen van CCS voor processen waarvan de emissies een hoge CO₂ concentratie hebben (ammoniak, ethyleen oxide en SMR).

- Het realiseren van de benodigde infrastructuur voor CO₂, H₂ en elektriciteit.
- Het aanpassen en uitbouwen van de logistieke ketens voor het inzetten van biomassa en kunststof als feedstock.

In de **periode 2030-2040** wordt aangeraden maximaal in te zetten op:

- Verdere opschaling van innovatieve technologieën voor industriële toepassing (onder andere ontwikkelt in het kader van het Moonshot innovatieprogramma).
- Het realiseren van piloot-, demo- en indien mogelijk commerciële projecten van nieuwe innovatieve technologieën.
- Het toepassen van CCS in sectoren waar de emissies lagere CO₂ concentraties hebben (met in eerste instantie toepassingen in de staalsector en vervolgens raffinage en chemie).

In de **periode 2040-2050** wordt aangeraden maximaal in te zetten op:

- Grootschalige en snelle uitrol van nieuwe productieprocessen (onder andere ontwikkelt in het kader van het Moonshot innovatieprogramma).
- Grootschalige en ambitieuze overschakeling op klimaatneutrale energiedragers.
- Het toepassen van CCS op resterende fossiele emissies in grote clusters.

De onzekerheden met betrekking tot innovaties zijn echter groot en de timings zijn daarom ook niet exact te voorspellen. Het is niet omdat technologieën technisch rijp zijn om op grote schaal te implementeren, dat ze er ook commercieel rijp voor zijn. Er is dan ook een faciliterend industrieel transitiekader nodig, met een sterke regierol voor de overheden, om dit te realiseren. Dit kader kan, samen met nieuwe technologische ontwikkelingen, een invloed hebben op de uiteindelijke realisatie van de roadmap.

De uitdagingen voor Vlaanderen zijn groot om de industriële transitie in te zetten. Enkel een sterke samenwerking tussen de overheid, industrie, kennisinstellingen en burgers en maatschappelijk middenveld kan dit realiseren.

Aangezien de industriële transitie zich afspeelt in een wereldwijde competitieve markt, is het noodzakelijk om bij de implementatie van deze transitie aandacht te hebben voor de concurrentiekracht van de industrie. Daarbij spelen de prijs van klimaatvriendelijke energiedragers en feedstocks, klimaatvriendelijke technologieën en de prijs van CO₂ een cruciale rol. Willen we dat de industrie maximaal inzet op deze nieuwe CO₂-reducerende technologieën, dan is er nood aan een **industriële transitieprogramma** dat over meerdere jaren loopt en die past in een beleidsvisie die ambitieus is en rechtszekerheid biedt aan de industrie die deze belangrijke investeringen voor zijn rekening neemt en oog heeft voor de internationale context waarin de bedrijven moeten werken en competitief blijven.

Innovatie en opschaling kunnen bijdragen om een versnelling in te zetten die resulteert in het tijdig beschikbaar maken van nieuwe klimaatvriendelijke technologieën die ook economisch toepasbaar kunnen zijn door hogere productie yield, efficiëntieverhogingen en daarmee gerelateerde kostenreducties. Dit kan de kans verhogen dat scenario's met belangrijke emissiereducties effectief mogelijk worden in Vlaanderen.

De **transitie naar klimaatneutraliteit zal grote inspanningen vragen van de bedrijven**, maar er is **een actieve regierol weggelegd voor de overheid**. Het zijn de bedrijven die uiteindelijk de industriële transitie dienen te realiseren, maar het is de overheid die een stabiel kader kan creëren om dit mogelijk te maken. Het verzekeren van de noodzakelijk randvoorwaarden zoals de tijdige opschaling en efficiëntieverbetering van innovaties, de aanwezigheid van logistiek en infrastructuur en de beschikbaarheid van competitieve energie- en grondstofprijzen zijn onontbeerlijk. In het kader van deze studie hebben we daartoe een rapport met 'Flankerend beleid' uitgewerkt, waarbij we voorstellen om maatregelen te voorzien naar beleidsaansturing, financiering, innovatiebeleid, regelgevend kader en infrastructuur.

Lexicon

BAU-scenario	'Business As Usual'-scenario. In dit rapport wordt deze term gebruikt om het referentiescenario aan te geven die gebruikt is in het algemene model. In dit BAU-scenario worden emissies gesimuleerd naar 2050 toe bij een ongewijzigde technologische situatie.
BIO max-scenario	Gesimuleerde transitiepad omtrent biomassa met maximaal haalbare scenario voor dit thema.
Biomassa	Er bestaat een diversiteit aan biomassavormen. Voor deze studie is voornamelijk gefocust op technologieën die kunnen werken met houtachtige biomassa, om concurrentie met andere functionaliteiten (bv. voeding) te vermijden. Ook andere biogebaseerde restafval is evenwel een te onderzoeken optie.
BOF	'Basic Oxygen Furnace'; hoogoven (gebruik in staalproductie).
CAPEX	Capital expenditure; enkel de investeringen in nieuwe en innovatieve technologieën.
CCS	Carbon Capture and Storage.
CCU	Carbon Capture and Utilisation.
CCUS	Combinatie van CCS en CCU.
CCUS max-scenario	Gesimuleerde transitiepad omtrent carbon capture met maximaal haalbare scenario voor dit thema.
CIRC max-scenario	Gesimuleerde transitiepad omtrent circulaire toepassingen met maximaal haalbare scenario voor dit thema.
EAF	'Electric Arc Furnace'; vlamboogoven (gebruik in staalproductie).
ELEC max-scenario	Gesimuleerde transitiepad omtrent elektrificatie en H ₂ met maximaal haalbare scenario voor dit thema.
HVC	High-Value-Chemicals (zoals bijvoorbeeld ethyleen, propyleen, butadieen, en BTX (benzeen, toluen en xyleen)).
MIX-scenario	Het voorgestelde verkenningsscenario
OPEX	Operational expenditure; enkel de kost van de energiedragers wordt meegenomen.
PDH	Propaan dehydrogenatie.
SMR	Methaan stoom reforming.
Syn(-)	Afkorting voor synthetisch.
Transitiepad	Mogelijke routes ('transitiepaden') voor een koolstofcirculaire en CO ₂ -arme Vlaamse industrie.
Var1	Een gesimuleerde eerste variant op het centraal verkenningsscenario (MIX) .
Var2	Een gesimuleerde tweede variant op het centraal verkenningsscenario (MIX) .

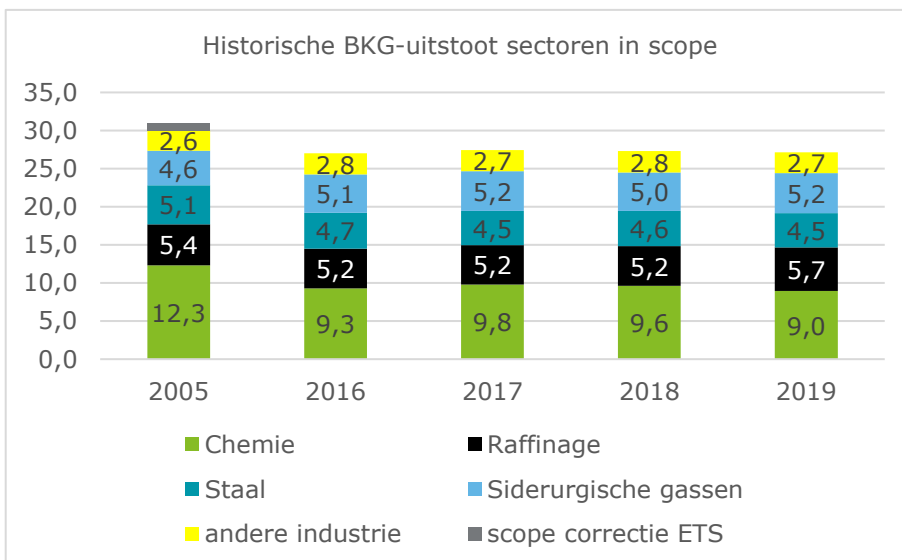
Introductie

Vlaanderen staat via de afspraken van het Parijs Klimaatakkoord en ambitieuze klimaatdoelstellingen van de Europese Unie voor een grote uitdaging.

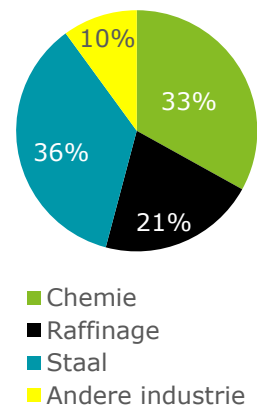
In het internationale klimaatakkoord uit 2015 werd een doelstelling om opwarming ver onder 2°C t.o.v. het pre-industriële tijdperk te houden, met als streefwaarde om dit te beperken tot 1,5°C. Daartoe heeft de Europese Unie klimaatdoelstellingen geformuleerd voor het jaar 2050, namelijk om dan broeikasgassen met 80-95% te verminderen (t.o.v. 1990). De EU heeft als interim mijlpaal dat de emissies tegen 2030 al met 40% verminderen (basisjaar 1990). Sectoren die vallen onder het Europese Emissiehandelssysteem (EU ETS) moeten 43% CO₂-emissies verminderen tegen 2030 (basisjaar 2005). Om dit te realiseren is het essentieel om klimaatneutraliteit na te streven tegen 2050.

De Vlaamse industrie vertegenwoordigt ongeveer 35% van het jaarlijkse Vlaamse totaal aan emissies. Hiervan zijn de chemie-, raffinage- en staalsectoren samen goed voor 86% van de broeikasgassen onder het EU ETS. Deze drie sectoren kunnen daarmee een bepalende rol spelen in het realiseren van significante emissiereducties in Vlaamse industrie. Temeer wegens de sectorale koppelingen die bestaan met andere downstream sectoren zoals papier, textiel, glas, keramiek, voeding en non-ferro.

Overzicht van de sectoren in scope



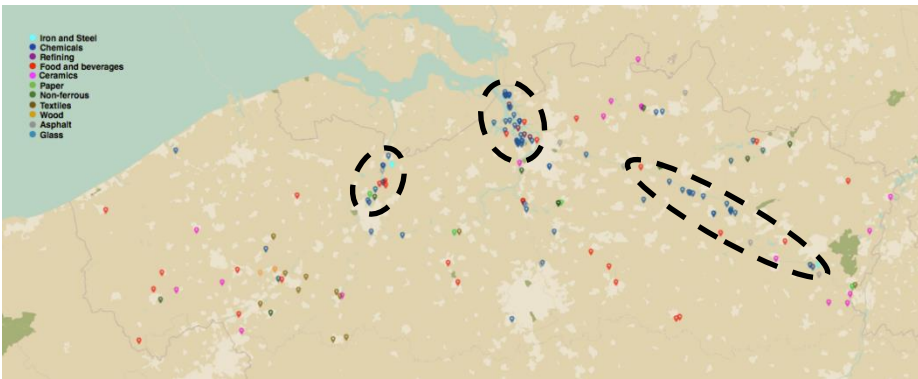
Aandeel verschillende sectoren in de BKG-uitstoot



Figuur 12 Historische BKG-emissies van de sectoren in de scope van deze studie + hun aandeel in de totale gedekte emissies. Bron: Vlaamse Overheid³⁰

³⁰ Cijfers o.b.v. ETS-data zoals gepubliceerd op de website van Departement Omgeving en scope correcties zoals opgenomen in het Voortgangsrapport 2016-2017. Alle emissies van de elektriciteitscentrales in Knippegroen en Rodenhuzen zijn toegewezen aan de staalsector, gezien deze voornamelijk voortkomen uit de verbranding van

De industrie en energiesectoren hebben de grootste bijdrage aan de jaarlijkse CO₂-emissies in Vlaanderen. Daarbinnen zijn het de chemie, raffinage, en staal³¹ sectoren in Vlaanderen die gezamenlijk de grootste impact hebben in een regio die hoogontwikkeld, dichtbevolkt en intensief geïndustrialiseerd is. Deze drie sectoren hebben weliswaar reeds verminderingen in hun CO₂-emissies waargemaakt en zij zullen naar de toekomst toe cruciaal zijn om een duurzame transitie te realiseren. Deze basisindustrie levert immers een breed scala aan producten die worden gebruikt in bijna alle downstream sectoren (bijvoorbeeld voor de productie van lichte materialen in het transport, installaties, isolatiematerialen voor huishoudens, brandstoffen in het transport, etc.).



Figuur 13 Kaartlegging van de industriële ETS-sites in Vlaanderen. De chemie, staal en raffinage zijn voornamelijk geclusterd rond de havens van Antwerpen en Gent, als ook het Albertkanaal.³²

Essencia rapporteert dat de chemische sector in 2019 een omzet had van €65,1 miljard en meer dan 91.000 directe en ruim 220.000 indirecte banen creëert³³. Zij is daarmee een van de belangrijkste industrietakken van België. Ze is goed voor een derde van de totale Belgische export, een derde van de toegevoegde waarde van de industrie en bijna 60% van alle private investeringen in onderzoek en ontwikkeling (R&D).

De raffinage-industrie is één van de belangrijkste economische pijlers van België. De petroleumproducten blijven een sleutelrol spelen in de energiebevoorrading, het vervoer, alsook de toelevering van feedstock aan de petrochemische industrie. De sector stelt 6.411 personen in 2018³⁴ te werk. Tussen 2005 en 2017 is de bruto toegevoegde waarde van petroleumproducten en de cokesproductie in Vlaanderen met 9% gestegen. In dezelfde periode investeerde de raffinage €1,7 miljard (i.e. 0,7% van de totale investeringen in Vlaanderen).

Ten slotte stelt de sectorfederatie voor de Belgische staal, GSV, dat de staalactoren gezamenlijk meer dan 10.000 directe, en 25.000 indirecte banen creëren in België. Tussen 2005 en 2017 is de bruto toegevoegde waarde van de fabricage van basismetalen met 5% gestegen. In diezelfde periode

siderurgische gassen. Er is ook vanuit gegaan dat jaarlijks ongeveer 900 kton CO_{2eq} in de raffinerijen gelinkt zijn aan de naftakraker binnen de raffinerijen: deze zijn in deze grafieken verschoven van de raffinage- naar de chemiesector.

³¹ Onder de staalsector wordt ook de ijzersector beschouwd.

³² Bron: IES-VUB, Vlaamse Overheid, Departement Omgeving, afdeling EKG, 2017.

³³ Essencia (2019). Chemie, kunststoffen en life sciences in België. Kerncijfers 2019. Life sciences behoren niet tot de scope van de opdracht.

³⁴ Belgische Petroleum Federatie (2019). Kerncijfers 2019.

investeerde deze industrie €1 miljard (i.e. 0,4% van de totale investeringen in Vlaanderen).

Doelstelling

Vlaanderen is niet de enige regio die voor een grote uitdaging staat om klimaatneutraliteit te bereiken. Ook andere landen en sectoren zijn hier mee bezig. Daartoe hebben sommige ook eigen roadmaps uitgestippeld.

Deze studie heeft tot doel te onderzoeken hoe de energie-intensieve industrie in Vlaanderen kan bijdragen tot significante CO₂-reducties door in te zetten op technologische innovaties. Ons onderzoek betreft de mogelijke innovaties in industriële processen en het gebruik van energie en feedstock. Ons onderzoek gaat niet in op de wijze waarop het energiesysteem (productie en distributie, noch beschikbaarheid van hernieuwbare energie) zich dient te organiseren. Wel is er bij de opbouw van het verkenningsscenario getracht om de vraag naar bepaalde feedstocks en energiedragers (zoals bv. elektriciteit) onder controle te houden, om de druk op de aanbodzijde te beheersen. Verder beperkt ons onderzoek zich tot de industrie en vormen emissies van andere sectoren zoals gebouwen en transport geen voorwerp van dit onderzoek.

Deze studie focust ook enkel op de directe emissies die worden veroorzaakt door de productie van industriële producten in Vlaanderen. De emissies gerelateerd aan de consumptie van industriële producten binnen Vlaanderen (inclusief geïmporteerde producten) wordt niet mee in rekening genomen. Ook de emissies gerelateerd aan de import van bepaalde tussenproducten (energiedragers en feedstocks) die worden verbruikt binnen de industrie, alsook de emissies gerelateerd aan de elektriciteit die de industrie afneemt van het elektriciteitsnet worden niet mee in rekening genomen.

Deze roadmapstudie heeft als doel om:

- Verschillende mogelijke scenario's te bestuderen om de implicaties van verschillende technologieën af te toetsen.
- Een verkenningsscenario met twee varianten te simuleren om een koolstofcirculair en CO₂-arme Vlaamse industrie te realiseren in 2050 geënt op het Vlaamse industrieel weefsel.
- De kosten die gepaard gaan met deze scenario's zo goed als mogelijk in te schatten.
- De uitdagingen en randvoorwaarden om deze scenario's te realiseren in kaart te brengen.
- Tussentijdse mijlpalen per decennium te definiëren voor het realiseren van deze scenario's en de bijhorende CO₂-reducties.
- De flankerende beleidsmaatregelen noodzakelijk om deze transitie te realiseren voor te stellen (zie daarvoor het rapport 'Leverbaarheid 8 - Flankerend beleid voor een koolstofcirculaire en CO₂-arme industrie in Vlaanderen).

Aanpak

De uitdaging naar een koolstofcirculaire en CO₂-arme Vlaamse industrie is groot: de chemie, raffinage en staal zijn energie-intensieve sectoren en stoten 85% van de broeikasgassen uit onder het EU ETS. Tegelijkertijd vormt deze basisindustrie een belangrijke motor van ons Vlaams economisch weefsel. Om tot significante CO₂-reducties te komen dienen oplossingen gezocht te worden binnen de thema's 'energie-efficiëntie', 'biomassa', 'circulariteit', 'elektrificatie en H₂' en 'carbon capture'.

Er werd in vorige fases van de studie gewerkt op een inventaris van relevante technologieën om daarna op basis van analyse van theoretische (maximale) transitiepaden inzake 'biomassa', 'circulariteit', 'elektrificatie en H₂' en 'carbon capture' een (proof-of-concept) verkenningsscenario voor te stellen dat gebaseerd is op de kenmerken en waardeketens van de Vlaamse industrie.

Inventarisatie relevante technologieën

De methodiek toegepast voor het analyseren en inventariseren van de technologieën wordt samengevat in Figuur 14.

In een eerste stap werd een inventaris gemaakt van zowel huidige technologieën als ook opkomende en beloftevolle nieuwe technologieën die op variërende Technology Readiness Levels (TRL) niveaus zitten. Er werden uiteindelijk een 80-tal technologieën geïnventariseerd. Voor meer details betreffende deze technologieën verwijzen we naar leverbaarheid 2 "Internationale positionering, status en potentieel van Vlaanderen".

Voor het identificeren van klimaatvriendelijke technologieën werden volgende elementen mee in overweging genomen:

- Het verwachte CO₂ reductiepotentieel, met waar mogelijk voorkeur voor technologieën die ook energie-efficiëntie verhogen en/of een hogere product yield hebben.
- De mogelijkheid om op te schalen tot hoge productievolumes (vb. boven 100,000 t/a).
- De huidige TRL van de technologie met oog op mogelijkheid tot bereiken van TRL 9 tegen ±2035. Voor technologieën met een hogere huidige TRL (vb. 6-7) wordt uitgegaan van grotere steun voor opzetten van piloot en demo projecten binnen de EU in komende jaren (vb. EU ETS innovatiefonds) waardoor versnelling naar TRL 8-9 kan optreden.
- Er worden ook enkele technologieën met lagere TRL (vb. 3-4) meegenomen omdat deze een groot potentieel naar CO₂ reductie aangeven, belangrijk zijn voor circulaire economie en/of omdat zij aangestipt zijn als belangrijke opties door bedrijfsgedreven R&D consortia. Deze opties zullen hoogstwaarschijnlijk niet voor ±2035 ingezet kunnen worden op grote schaal.

In een tweede stap werd de volledige lijst van technologieën geprioriteerd aan de hand van expertbeoordeling en de fit met de Vlaamse industrie.

De volgende principes werden hierbij toegepast:

- Hanteren van een koolstofcirculaire en CO₂-arme benadering waarbij maximaal wordt gestreefd naar valorisatie van koolstof door deze terug in te brengen in de waardeketen en emissies in de atmosfeer te vermijden.



Figuur 14 Filteren van technologieën in het model.

- Hanteren van een technologiemix die gebaseerd is op het principe van technologieneutraliteit. Hierdoor wordt geen enkel thema bij voorbaat uitgesloten. Deze technologiemix moet gezien worden als een zich nog te bewijzen 'proof-of-concept', niet als een voorspelling van de toekomst.
- Vermijden van een unieke of grote afhankelijkheid van één type feedstock of energiedrager door verschillende, maar compatibele productieroutes naar producten mogelijk te maken.
- Het inbouwen van innovatieve technologieën die verder onder een innovatieprogramma onderzocht kunnen worden.
- Waar mogelijk in te zetten op industriële symbiose (bijvoorbeeld tussen staal en chemie en/of voeding).
- Maximaal rekening houden met de bestaande waardeketens en clustering van het industrieel weefsel op basis van onze voorafgaande analyse, de uitgevoerde bedrijfsbezoeken en talrijke gesprekken met sectorfederaties. Significante reducties zouden daardoor behaald kunnen worden zonder dat waarde vernietigd hoeft te worden (i.e. fabriek hoeven niet te sluiten of afgebroken te worden).

Omdat chemie, raffinage en staal opereren in industriële clusters, werd ook de interne logica en cohesie van de waardeketen in acht genomen bij deze analyse. Onder andere het gebruik van nieuwe platformmoleculen (ethanol, methanol) die geproduceerd kunnen worden via verschillende technologieën, en de (potentiële) sectorkoppeling die bestaat tussen de verschillende sectoren. Er werden in de tweede stap 48 technologieën weerhouden. De volledige lijst kan in Appendix A teruggevonden worden. Een beschrijving van deze technologieën werd opgenomen in Leverbaarheid 2 van deze studie.

In de technologiekeuzes hebben we enkel de bestudeerde technologieën weerhouden waarvan verwacht wordt dat ze voldoende perspectief hebben om commercieel beschikbaar te zijn tegen 2030, dat zij opschaalbaar zijn en waar mogelijk vanaf 2035³⁵ hoge productie yield en energie-efficiëntie tonen. Dit is een zeer ambitieuze uitdaging en dit vormt de inzet die men vanuit innovatie wenst te realiseren. Indien we erin slagen om via innovaties, die deels uit de Moonshot projecten kunnen volgen, een versnelling in te zetten die resulteert in het tijdig beschikbaar maken van nieuwe klimaatvriendelijke technologieën die ook economisch toepasbaar kunnen zijn door hogere productie yield, efficiëntieverhogingen en daarmee gerelateerde kostenreducties dan verhoogt dit de kans dat scenario's met significante emissiereducties effectief gerealiseerd worden in Vlaanderen. De huidige roadmap toont een ambitieuze roll-out van technologieën, maar men moet tegelijkertijd zeer ambitieus zijn om aan de objectieven van CO₂-reductie te voldoen. De haalbaarheid van deze ambitieuze roll-out is afhankelijk van een aantal randvoorwaarden, zoals verder in dit rapport beschreven (p. 39 en verder). **Indien dit niet lukt in realiteit, dan moet de transitie op een nog kortere tijdsperiode plaatsvinden en/of sterker ingezet worden op CO₂-afvang, om dezelfde CO₂-reducties tegen 2050 realiseren. Tevens wordt gerekend op het Moonshot innovatieprogramma om nieuwe technologieën die zowel de rentabiliteit als de CO₂-reductie moeten maximaliseren te kunnen implementeren.**

³⁵ Deze jaartallen zijn algemene benaderingen voor het brede scala aan innovatieve technologieën. Individuele technologieën kunnen hiervan afwijken en eerdere of latere timings hebben.

In een derde stap werd een technologiemix bepaald die per scenario verschilt. De scenario's worden hieronder verder toegelicht in een aparte sectie rond scenario analyse.

Werking model en aanpak scenario's

De studie is gebaseerd op een analyse van verschillende transitiepaden, zijnde het gebruik van alternatieve grondstoffen (o.a. biomassa), elektrificatie en H₂ (waterstof), het afvangen en opslaan van CO₂ (CCS) en gebruik van CO₂ (CCU) en circulariteit (voornamelijk hergebruik van kunststof). Voor elk van deze transitiepaden werd onderzocht welke CO₂-reducties maximaal technisch mogelijk zijn rekening houdend met de beperkingen voor wat energie en feedstock betreft.

Hiertoe werd een kwantitatief model ontwikkeld dat toelaat om de potentiële ontwikkelingen inzake de industriële productie in Vlaanderen te simuleren. Concreet laat het model toe om verschillende evoluties te veronderstellen m.bt.:

- Het productieniveau per type industrieel product.
- De technologiemix waarmee de verschillende producten worden gemaakt.
- De efficiëntieverbeteringen die worden verwacht per technologie.
- Mogelijke fuel switches binnen elke technologie.
- De toepassing van CO₂-afvang voor elke technologie.

Vervolgens brengt het model de impact van deze assumpties op de broeikasgasemissies, energie- en feedstockverbruik en de kosten (CAPEX/OPEX) voor de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën in kaart. In lijn met de scope van dit onderzoek gaat het model niet in op het energiesysteem (productie en distributie van elektriciteit), noch op evoluties in andere sectoren buiten de Vlaamse industrie.

Het is belangrijk om te benadrukken dat **het gehanteerde model geen optimalisatiemodel is en dat het dus niet automatisch de meest kostenefficiënte route berekent om tot een gewenst resultaat (bv. emissiereducties tegen 2050) te komen (backcasting)**. Het is daarentegen een simulatiemodel, waarbij het eindresultaat en de route daarnaartoe het resultaat zijn van de assumpties en keuzes die de gebruiker invoert (forecasting). Zo laat het toe de impact van variërende assumpties transparant in kaart te brengen. Op basis van vooraf geïdentificeerde scenario's hebben we aan de hand van het model simulaties uitgevoerd. Op basis van dit model werden **een aantal scenario's ontwikkeld voor deze studie**:

- In eerste instantie werd er een referentiescenario (**BAU**) (zonder interventies) doorgerekend om de verwachte evoluties tot 2050 in kaart te brengen.
- Vervolgens werd het potentieel van elk transitiepad apart in kaart gebracht. Daartoe werden vier 'maximale' scenario's uitgewerkt waarin telkens maximaal werd ingezet op één van de vier thematische transitiepaden: **BIO max** (biomassa-route), **CIRC max** (circulariteit-route), **ELEC max** (elektrificatie-route incl. waterstof) en **CCUS max** (carbon capture-route en inzet van synthetische brandstoffen).
- Op basis van deze analyse, hebben is er dan een centraal verkenningsscenario (**MIX**) onderzocht dat inzet op een combinatie van de vier transitiepaden. Daarbij werd rekening gehouden met een aantal principes, zoals technologie-neutraliteit (geen enkel thematisch

transitiepad bij voorbaat uitsluiten), het nastreven van significante emissiereducties, het hanteren van een koolstofslimme benadering (maximale valorisatie van koolstof door deze terug te brengen in de waardeketen en zo emissies in de atmosfeer te vermijden), de inzet op industriële symbiose, het vermijden van grote afhankelijkheid van bepaalde energiebronnen en feedstocks, het maximale behoud van de bestaande waardeketen (bv. geconcentreerde focus op die stappen in de waardeketen die de meeste emissies veroorzaken, vermijden van vroegtijdige vervanging van installaties) en bestaande roadmaps van bedrijven uit de industrie. Er werd echter niet expliciet rekening gehouden met de kostenefficiëntie van de gehanteerde energie- en technologiemix³⁶.

- Vertrekkende van het centrale verkenningsscenario (**MIX**) zijn er tevens twee variaties ('Var1' en 'Var2') onderzocht die - voor wat betreft de belangrijkste productieprocessen - rekening houden met alternatieve energieprijzen en daaruit volgend alternatieve technologiekeuzes om het effect hiervan te kunnen onderzoeken. Deze beperkte, bijkomende analyse geeft een eerste indicatie van het effect van energieprijzen op de technologiekeuze. Een grondige analyse van het effect van energie- en technologieprijzen op de verwachte technologiemix (bv. via optimalisatie) ligt buiten de scope van deze studie en vereist verder onderzoek.

De ontwikkelde scenario's zijn bedoeld als verkenningen om het (gecombineerde) potentieel van de verschillende thematische transitiepaden in kaart te brengen, mogelijke synergieën en symbioses te verkennen, een idee van ordegrrootte te krijgen over de potentiële emissiereducties, het energie- en feedstockverbruik en de verwachte OPEX/CAPEX voor de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën en vereiste randvoorwaarden en uitdagingen te identificeren. Op basis hiervan werden een aantal aanbevelingen ontwikkeld die zijn opgenomen in het document 'Flankerend beleid'.

De scenario's moeten dus niet beschouwd worden als toekomstvoorspellingen noch als een te volgen ontwikkelingspad. Hoe de toekomst er uiteindelijk zal uitzien zal afhangen van verdere technologische ontwikkeling, de evolutie van economische factoren (energie- en feedstockprijzen, marktevoluties) en beleidskeuzes (bv. reductiedoelstellingen en evolutie van CO₂-prijzen).

De scenario's zijn opgebouwd o.b.v. wetenschappelijk onderzoek, overleg met verscheidene experts en gevalideerd volgens de governance van het project. Tijdens verschillende werksessies zijn de onderliggende assumpties, technologie-keuzes, datapunten, etc. besproken. Daarnaast zijn deze verder besproken met experts en sectorfederaties. Vervolgens zijn deze ook finaal besproken tijdens de stuurgroepen van het project.

Chemie

Transitiepad Korte omschrijving

Referentie 'BAU'	<ul style="list-style-type: none"> • Productie houdt rekening met de nieuwe geplande investeringen in Antwerpen voor Ineos en Borealis (+50% HVC-productie vanaf 2025), productieniveaus van overige sectoren (chlorine, ammoniak en 'andere chemicaliën') blijven stabiel. • Vanaf 2025, gebeurt 61% van HVC-productie via nafta stoomkrakers (24% via PDH, en 15% via ethaan stoomkrakers). • Voortzettende efficiëntieverbeteringen van 0,5% per jaar.
Biomassa 'BIO max'	<ul style="list-style-type: none"> • Tegen 2050 worden HVC's grotendeels geproduceerd door biogebaseerde technologieën (i.p.v. nafta stoomkrakers) (start 2035). • Tegen 2050 gebeurt warmteproductie voor 20-25% uit biobrandstoffen, en 3% biogas als input voor ammoniakproductie (start 2025).

³⁶ Er werd enkel op benaderende wijze rekening gehouden met kostenefficiëntie, door bv. de huidige waardeketen maximaal te behouden, technologieën met een hoog energie- en feedstockverbruik en weinig perspectief op efficiëntieverbeteringen geen of slechts een beperkte rol te laten spelen, etc.

Circulair 'CIRC max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 worden HVC's grotendeels geproduceerd door circulaire technologieën (i.p.v. nafta stoomkrakers) (start 2035).
Elektrificatie en H ₂ 'ELEC max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 worden HVC's zoveel mogelijk geproduceerd door elektrificatie technologieën (i.p.v. nafta stoomkrakers) (start 2035). Tegen 2050 is 80% van Haber-Bosch vervangen door CO₂-arme ammoniakproductie (via elektrolyse en H₂) (start 2035). Tegen 2050 is 50% van de warmteproductie voor overige producten geëlektrificeerd (start 2035). Elektrificatie van het resterende aardgas in de Haber-Bosch- en chloorproductie (start 2030, volledige elektrificatie tegen 2050).
Carbon Capture 'CCUS max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 worden HVC's zoveel mogelijk geproduceerd door CCUS technologieën (start 2035). Tegen 2030 is 89% van de ammoniak en H₂-productie CO₂ opgevangen (start 2025). Tegen 2050 is 90% van alle resterende CO₂ van HVC-productie opgevangen (start 2035). Tegen 2050 is 80% van de warmteproductie voor andere chemische sectoren de CO₂ opgevangen (start 2035). Ethanolproductie komt voor 100% via Steelanol-route (i.p.v. import). Methanolproductie komt voor 100% uit de CCU-route (CO₂+H₂) (i.p.v. import).
Centraal 'MIX'	<ul style="list-style-type: none"> Productie stijgt minder sterk dan in het BAU-scenario (+30% HVC-productie vanaf 2025 i.p.v. +50% onder BAU). Verbeterde efficiëntie: 0,8% per jaar (ammoniak/chloor/HVC/methanol/ethanol/H₂) en 1% per jaar (warmtegebruik voor overige chemicaliën). Tegen 2050 zijn de nafta stoomkrakers voor HVC productie volledig vervangen door een combinatie van circulaire technologieën (22%), productieprocessen o.b.v. ethanol & methanol (15%), elektrificatietechnologieën (20%) en o.b.v. biomassa (5%); Tegen 2050 wordt de vraag naar H₂ voor feedstockgebruik ingevuld door een combinatie van SMR (45%), electrolyse (20%), import (20%) en methaanpyrolyse (15%); Tegen 2050 is 40% van de Haber-Bosch vervangen door CO₂-arme ammoniakproductie (via elektrolyse, H₂ en N₂) (start 2035). Tegen 2050 wordt 40% van het aardgasverbruik voor chlorine en ammoniakproductie vervangen (20% elektrificatie en 20% syn-brandstoffen, enkel toegepast op aardgasinput voor energetisch verbruik). Tegen 2050 wordt 50% van het aardgasverbruik voor warmteproductie voor overige chemicaliën vervangen (20% elektrificatie, 20% syn-brandstoffen, 10% biobrandstoffen). Tegen 2030 is 89% van de ammoniakproductie CO₂ opgevangen (start 2025). Tegen 2050 is 80% van alle resterende CO₂ van HVC-productie opgevangen (start 2035). Tegen 2050 is 60% van de warmteproductie voor andere chemische sectoren de CO₂ opgevangen (start 2035).
Variatie 1 'Var1'	<p>Volgende wijzigingen t.o.v. centraal 'MIX'</p> <ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 zijn de nafta stoomkrakers voor HVC productie volledig vervangen door een combinatie van circulaire technologieën (22%), nafta schokgolfreactoren (29%), en in beperktere mate door ethaan oxydehydratatie (7%) en OCM (3%). Geen inzet van methanol/ethanol gebaseerde productieprocessen, noch van bio-based HVC productie; Tegen 2050 wordt de vraag naar H₂ voor feedstockgebruik ingevuld door een combinatie van SMR (30%), electrolyse (60%) en methaanpyrolyse (10%); Tegen 2050 is 50% van de Haber-Bosch vervangen door CO₂-arme ammoniakproductie (via elektrolyse, H₂ en N₂) (start 2035); Tegen 2050 wordt 55% van het aardgasverbruik voor chlorine en ammoniakproductie vervangen (40% elektrificatie en 15% syn-brandstoffen, enkel toegepast op aardgasinput voor energetisch verbruik). Tegen 2050 wordt 67,5% van het aardgasverbruik voor warmteproductie voor overige chemicaliën vervangen (50% elektrificatie, 12,5% syn-brandstoffen, 5% biobrandstoffen);
Variatie 2 'Var2'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 wordt de vraag naar H₂ voor feedstockgebruik ingevuld door een combinatie van SMR (60%), import (20%) en methaanpyrolyse (20%). Geen inzet van electrolyse; Tegen 2050 zijn de nafta stoomkrakers voor HVC productie gedeeltelijk vervangen door een combinatie van circulaire technologieën (22%), productieprocessen o.b.v. ethanol & methanol (10%) en o.b.v. biomassa (5%);. Geen inzet van elektrificatietechnologieën (bv. schokgolffactor); Geen vervanging van Haber-Bosch (enkel toepassing CO₂ afvang); Tegen 2050 wordt 25% van het aardgasverbruik voor chlorine en ammoniakproductie vervangen door syn-brandstoffen, geen inzet van elektrificatie (enkel toegepast op aardgasinput voor energetisch verbruik). Tegen 2050 wordt 32,5% van het aardgasverbruik voor warmteproductie voor overige chemicaliën vervangen (22,5% syn-brandstoffen, 10% biobrandstoffen). 80% van de resterende emissies wordt afgevangen.

Raffinage

Transitiepad	Korte omschrijving
Referentie 'BAU'	<ul style="list-style-type: none"> Productie daalt met 15% tussen 2015-2030. Voortzettende efficiëntieverbeteringen (10% tussen 2015 en 2050).
Biomassa 'BIO max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 is 25% van aardgas vervangen door bio-methaan (start 2025, lineaire groei).
Circulair 'CIRC max'	<ul style="list-style-type: none"> Gelijk aan het BAU-scenario.
Elektrificatie en H ₂ 'ELEC max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 is 25% van aardgasverbruik vervangen door elektriciteit (start 2030, lineaire groei).
Carbon Capture 'CCUS max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 is 80% van de CO₂-emissies opgevangen (start 2035). Tegen 2050 is 50% van aardgas vervangen door syn-brandstoffen.
Centraal 'MIX'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 is 80% van de CO₂-emissies opgevangen (start 2035). Tegen 2050 is 55% van aardgas vervangen (40% elektrificatie en 15% syn-brandstoffen).

Variatie 1 'Var1'	• Tegen 2050 is 70% van aardgas vervangen (60% elektrificatie en 10% syn-brandstoffen)
Variatie 2 'Var2'	• Tegen 2050 is 25% van aardgas vervangen (25% syn-brandstoffen, geen inzet van elektrificatie)

Staal

Transitiepad	Korte omschrijving
Referentie 'BAU'	<ul style="list-style-type: none"> Productie stijgt met 10% tussen 2015-2050. Technologiemix blijft stabiel: 87% BOF (Blast Oxygen Furnace)-hoogovens, 13% EAF (Electric Arch Furnace)-vlamboogovens. Voortzettende efficiëntieverbeteringen van 0,5% per jaar.
Biomassa 'BIO max'	• Tegen 2050 is 20% van steenkool vervangen door vaste biomassa in BOF-hoogovens (start 2030, lineaire groei).
Circulair 'CIRC max'	<ul style="list-style-type: none"> Gelijk aan het BAU-scenario, maar lagere productieniveaus door stijgende productie van secundair staal en daardoor dalende vraag naar primair staal (van 6 naar 5,5 Mton primair staal in 2050). Tegen 2050 wordt 23% van steenkoolinput vervangen door afval en CO₂ (67% van BOF-hoogovens worden gevoed door IGAR-technologie) (start 2035).
Elektrificatie en H ₂ 'ELEC max'	<ul style="list-style-type: none"> Één van de twee Gentse BF-BOF-hoogovens wordt vervangen door de H₂-DRI-technologie (start 2035). 20% van steenkool in overige BOF-hoogoven wordt vervangen door H₂ (start in 2030, lineaire groei).
Carbon Capture 'CCUS max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2045 is 90% van de CO₂-emissies opgevangen (start 2030). 50% van aardgas wordt vervangen door syn-brandstoffen.
Centraal 'MIX'	<ul style="list-style-type: none"> Verbeterde efficiëntie: 0,8% per jaar. 45% van de steenkool vervangen (door 13,5% (plastiek)afval, 13,5% H₂, en 13,5% door biomassa). 25% van het resterende steenkoolverbruik wordt vervangen door vaste koolstof als restproduct uit methaanpyrolyse. Tegen 2045 is 85% van alle resterende CO₂ opgevangen (start in 2030).
Variatie 1 'Var1'	• Licht hogere inzet van H ₂ t.o.v. Centraal 'MIX' (17% i.p.v. 13,5%)
Variatie 2 'Var2'	• Geen inzet van H ₂ , steenkool wordt voor 30% vervangen (door 13,5% (plastiek)afval en 17% door biomassa)

Overige industrieën

Transitiepad	Korte omschrijving
Referentie 'BAU'	<ul style="list-style-type: none"> Productiestijging voor voeding (+50%), keramiek (+40%) en papier (+20%), stabiele productie voor non-ferro en lichte daling voor glas (-10%) Vereenvoudigde aanpak voor warmteproductie: alle warmte wordt geproduceerd in boilers met 85% efficiëntie, met aardgas als voornaamste energiebron (klein aandeel stookolie en biomassa voor hoge temperatuurwarmte). Voortzettende efficiëntieverbeteringen van 0,5% (voor warmteverbruik) per jaar, efficiëntie van warmteopwekking stijgt tot 90% in 2050.
Biomassa 'BIO max'	<ul style="list-style-type: none"> Tegen 2050 komt 25% van warmteproductie uit biomassa (i.p.v. fossiele brandstoffen). Lage temperatuurwarmte (papier en voeding) schakelt volledig over op het gebruik van biobrandstoffen voor warmteproductie. Voor hoge temperatuurwarmte (glas, non-ferro, keramiek, andere chemie) wordt er beperkter ingezet op biobrandstoffen (20% van de energiemix tegen 2050).
Circulair 'CIRC max'	• Gelijk aan BAU-scenario.
Elektrificatie en H ₂ 'ELEC max'	<ul style="list-style-type: none"> Lage temperatuurwarmte (papier en voeding) wordt voor 75% geëlektrificeerd. Hoge temperatuurwarmte (glas, non-ferro, keramiek) wordt voor 25% geëlektrificeerd.
Carbon Capture 'CCUS max'	<ul style="list-style-type: none"> Geen CCS in kleinere industrieën buiten clusters. 50% van industriële warmte vervangen door syn-brandstoffen (ammoniak, methanol, ...).
Centraal 'MIX'	<ul style="list-style-type: none"> Verbeterde efficiëntie: 1% per jaar (hoger wegens de betere marges in kleine sectoren). 45% van warmte uit aardgas 15% van warmte uit syn-brandstoffen (7,5% pure H₂, 7,5% e-methaan). 15% van warmte uit biomassa. 25% van warmte uit elektriciteit
Variatie 1 'Var1'	<ul style="list-style-type: none"> 25% van warmte uit aardgas 8% van warmte uit syn-brandstoffen (6% pure H₂, 2% e-methaan). 7% van warmte uit biomassa 60% van warmte uit elektriciteit.
Variatie 2 'Var2'	<ul style="list-style-type: none"> 60% van warmte uit aardgas 20% van warmte uit syn-brandstoffen (4% pure H₂, 16% e-methaan). 20% van warmte uit biomassa Geen elektrificatie

Tabel 1 Beknopt overzicht assumpties/implicaties van de scenario's voor elke sector.

Uitgebreidere achtergrondinformatie voor elk van scenario's is terug te vinden in Appendix C.

Basisjaar

Voor de broeikasgasreducties wordt 2005 gebruikt als referentiejaar (i.p.v. 1990) omdat er pas vanaf 2005 data beschikbaar is die de opsplitsing maakt tussen ETS en niet-ETS-sectoren, alsook de emissies voor siderurgische gassen in de elektriciteitssector publiek gekend zijn.

Voor de overige data (bijv. feedstock- en energieverbruik, carbon capture toepassing, etc.) zal 2015 als referentiejaar worden gebruikt.

Centraal verkenningsscenario

Er bestaat **geen 'silver bullet'** om een koolstofcirculaire en CO₂-arme Vlaamse industrie te bereiken. Er wordt daarom gewerkt met een centraal verkenningsscenario (**MIX**) wat een combinatie is van innoverende technologieën met betrekking tot de thema's 'biomassa', 'circulariteit', 'elektrificatie en H₂' en 'carbon capture'. Hierbij worden de principes gehanteerd die in het vorige hoofdstuk gedefinieerd werden.

Het centraal verkenningsscenario kan leiden tot een broeikasgasreductie van 86,4% in 2050 ten opzichte van 2005, ervan uitgaand dat de momenteel beschikbare technologieën met lage TRL's implementeerbaar zijn op deze termijn en economisch rendabel worden. De resterende emissies bedragen 4,2 Mton CO_{2eq.}. Hierbij wordt geen rekening gehouden met vermeden emissies. De vermeden verbranding door hergebruik van kunststof bedraagt 4 Mt. CO_{2eq.} of 16% extra CO₂-reductie tegen 2050. Rekening houdend met de vermeden emissies van kunststof kan potentieel klimaatneutraliteit bereikt worden.

Verder zijn er vermeden emissies inzake de opvang van biogene koolstof in de Vlaamse industrie en gebruik van syn-brandstoffen voor transport (buiten de Vlaamse industrie) niet gekwantificeerd binnen deze studie.

De uiteindelijke technologiemix van de toekomst zal naast technologische ontwikkeling ook sterk beïnvloed worden door de kostprijs en beschikbaarheid van energiedragers (o.a. elektriciteit, aardgas, H₂, biomassa, kunststofafval, etc.) en feedstocks (o.a. nafta, propaan, ethaan). Vandaar dat er twee varianten zijn gesimuleerd met alternatieve prijzen voor energie en feedstocks en een beperkt gewijzigde technologiemix. Dit wordt besproken in een apart hoofdstuk. De realiteit kan echter nog afwijken van de drie scenario's, omdat deze een verkenning van de toekomst zijn. De vergelijking van de resultaten over de 3 verkenningsscenario's heen leiden wel tot inzichten die een 'must have' zijn voor de Vlaanderen om mee te starten of verder uit te werken en die in elks van de scenario's een belangrijke rol zullen spelen. In het hoofdstuk 'Aanpak' wordt er dieper ingegaan op de samenstelling van de scenario's en de modelaanpak.

In dit hoofdstuk bespreken we wat dit centraal verkenningsscenario (**MIX**) betekent voor de **Vlaamse industrie als geheel, alsook de impact per sector**.

1. Implicaties voor de Vlaamse industrie als geheel

Samenvatting

De analyse toont aan dat een **combinatie van de onderzochte transitiepaden** het potentieel biedt om **belangrijke emissiereducties** te verwezenlijken in de Vlaamse industrie. In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) leidt de inzet van dergelijke technologieën tot **86,4%** broeikasgasreducties in 2050 (t.o.v. 2005), bij een stijgende productie van de onderzochte sectoren met 3% tegen 2050, ervan uitgaand dat de momenteel beschikbare technologieën met lage TRL's implementeerbaar zijn

op deze termijn en economisch rendabel worden. We houden hierbij rekening met de reeds aangekondigde investeringen en verwachte toekomstige productiestijgingen.

Tussen 2020 en 2030 zouden de emissies met ongeveer 0,5 Mton CO_{2eq.} per jaar kunnen worden gereduceerd. In het volgende decennium (2030-2040) zou de reductiesnelheid kunnen verdubbelen tot 1 Mton CO_{2eq.} per jaar naarmate nieuwe, innovatieve technologieën marktrijp worden, om vervolgens terug te zakken tot ongeveer 0,8 Mton CO_{2eq.} per jaar tussen 2040 en 2050.

Bijna de helft van de reducties in dit scenario worden verwezenlijkt door CO₂-afvang (12,4 Mton CO_{2eq.} van de 26,8 Mton CO_{2eq.} reductie tussen 2005 en 2050), en iets meer dan de helft door inzet van efficiëntieverbetering, overschakeling op alternatieve brandstoffen en de inzet van nieuwe, innovatieve productieprocessen (14,4 Mton CO_{2eq.} van de 26,8 Mton CO_{2eq.} reductie tussen 2005 en 2050³⁷). De resterende emissies voor de industrie in 2050 bedragen 4,2 Mton CO_{2eq.} in het centraal verkenningsscenario.

Randvoorwaarden

Om de transitie te verwezenlijken en de bijhorende emissiereducties te realiseren is er een belangrijke rol weggelegd voor het beleid, vnl. op Europees maar ook op Vlaams niveau. Enerzijds zal er een **voldoende prikkel** nodig zijn opdat de industrie zou (kunnen) investeren in CO₂-reducerende technologieën, anderzijds dient er over gewaakt te worden dat de competitiviteit van de Vlaamse (en bij uitbreiding Europese) industrie gevrijwaard wordt door te voorzien in **een level playing field** tussen Europese en niet-Europese bedrijven. Deze laatsten zijn vaak niet gebonden door een ETS-systeem en dienen geen bijhorende CO₂-kosten te betalen wat hen een voordeel geeft in een geglobaliseerde markt van import en export.

Er zijn een aantal **belangrijke randvoorwaarden en uitdagingen** aan het realiseren van de transitie, die hierna worden opgelijst. Anderzijds biedt de transitie ook mogelijke nieuwe opportuniteiten voor Vlaanderen door in te zetten op de ontwikkeling van nieuwe technologieën die achteraf ook kunnen geëxporteerd worden en Vlaanderen kunnen positioneren als een innovatieleider in de klimaattransitie maar ook het versterken van de reeds efficiënte en goedwerkende industrie wat kan leiden tot een nog sterkere verankering en een aanzuigefect.

We verwijzen ook naar leverbaarheid 8 m.b.t. het 'Flankerend beleid' waarin voorgestelde beleidsmaatregelen zijn opgenomen om de transitie te faciliteren.

Ontwikkeling en opschaling van koolstofcirculaire en CO₂-arme technologieën en het ondersteunen van commerciële implementatie ervan

De onderzochte technologieën die worden toegepast in de verkenningsscenario's zijn vandaag ofwel nog niet ontwikkeld, ofwel in een vroeg stadium van ontwikkeling of zijn technologisch volledig ontwikkeld maar vooralsnog niet rendabel om op commerciële schaal te implementeren.

Om belangrijke reducties tegen 2050 te verwezenlijken **moeten nieuwe technologieën ontwikkeld worden en moeten technologieën met**

³⁷ Waarvan ongeveer 4Mt reductie reeds werd verwezenlijkt tussen 2005 en nu.

lagere TRL's verder ontwikkeld worden om ze op te schalen en doorbraken te realiseren door het stimuleren van innovatie en onderzoek. Een belangrijk aspect van deze ontwikkeling betreft ook het commercieel aantrekkelijk maken van deze technologieën door in te zetten op hogere efficiëntiewinsten. Aanvullend zou kunnen worden onderzocht hoe kostenreductie door het gebruik van bijvoorbeeld goedkopere materialen kan gerealiseerd worden.

Daarnaast zijn er reeds enkele CO₂-reducerende technologieën momenteel beschikbaar die **technologisch klaar zijn om uitgerold te worden op grote schaal, maar waarvan de business case (nog) niet positief is** en ze geen bijkomende toegevoegde waarde leveren t.o.v. bestaande technologieën. Hier is een belangrijke rol weggelegd voor het beleid om dit te faciliteren door o.a. tijdelijk te voorzien in CAPEX- en/of OPEX-ondersteuning, maar ook het ter beschikking stellen van de nodige infrastructuur en het bekijken van het wetgevend kader. Bovendien is er ook voor deze technologieën nog een belangrijke rol voor onderzoek en innovatie door in te zetten op het commerciële aspect zoals efficiëntiewinsten.

De verkenningsscenario's voorzien een zeer ambitieuze uitrol op een tijdspanne van 15 jaar (2035-2050) om in 2050 belangrijke reducties te verwezenlijken. Dit is veel sneller dan de gangbare uitrol van nieuwe technologieën, wat voor de industrie grote uitdagingen zal vergen niet alleen op het vlak van engineering, maar ook op het vlak van vergunningsprocedures, marktwerking, etc.

Deze timing is erg ambitieus en zal significante inspanningen vergen en dit zowel op het vlak van onderzoek en ontwikkeling, maar ook in het opzetten en ondersteunen van demonstratieprojecten. Er is nood aan verdere technologische ontwikkeling, maar evenzeer opschaling en verbeteren/stimuleren van de business case van deze technologieën teneinde deze commercieel toepasbaar te maken. Anderzijds is dergelijke ambitieuze timing de enige manier om significante emissiereducties tegen 2050 te realiseren, zonder deze volledig te laten afhangen van CO₂-afvang. Om de opschaling van deze technologieën enerzijds en de industriële toepassing ervan anderzijds te versnellen, zullen inspanningen nodig zijn van alle betrokken stakeholders (overheid, bedrijven en onderzoekswereld), maar tevens zullen flankerende maatregelen van onder meer de overheid noodzakelijk zijn.

Een flankerend maar stabiel beleidskader om een *business case* voor klimaatvriendelijke investeringen te verzekeren en tegelijkertijd een level playing field te creëren

Onder de gesimuleerde scenario's wordt verwacht dat de productiekosten zullen stijgen t.o.v. vandaag, voornamelijk door een combinatie van een nood aan investeringen in nieuwe productietechnologieën, de toepassing van CO₂-afvang in bestaande installaties en de overschakeling op alternatieve, duurere energiedragers en feedstocks. De investeringen voor industrieën om koolstofcirculair en CO₂-arm te worden, zijn dan ook anders van aard t.o.v. reguliere investeringen die vooral focussen om tot meer omzet te leiden of de kosten op lange termijn te dempen. Anderzijds is de verwachting dat de OPEX kosten onder het 'business-as-usual' scenario nog veel sterker zouden stijgen en dit door een sterke, veronderstelde stijging van de CO₂-prijs (tot €300/t CO_{2eq.} in 2050) die Europa zal hanteren om de transitie te sturen.

Europa zal door het hanteren van een voldoende hoge CO₂-prijs via het **ETS-systeem** (en/of andere sturende beleidsmaatregelen) **een sterk sturend beleid voeren om de industrie te laten omschakelen**. Vlaanderen schikt zich naar deze doelstellingen en de Vlaamse industrie zal hier dus ook mee geconfronteerd worden. Dit beleid zal ervoor zorgen dat de industrie gestuurd zal worden om te investeren in CO₂-reducerende technologieën om deze hoge CO₂-kosten te vermijden. Desalniettemin kennen deze technologieën vaak nog geen concurrentiële business case omdat vb. de efficiëntiewinsten ervan lager liggen t.o.v. de huidige technologieën of omdat de nieuwe energie en feedstock nog niet voldoende beschikbaar is en aan een competitieve prijs. Dergelijke investeringen kennen ook een lange doorlooptijd vooraleer ze effectief operationeel zijn, wat leidt tot significante voorinvesteringen.

Daarnaast opereren en concurreren de Europese bedrijven in een globale context en dienen ze te concurreren met bedrijven die niet gebonden zijn door ETS-regels. Europa en Vlaanderen moet vermijden dat de industrie wegtrekt uit het continent om zich te vestigen in andere werelddelen waar ze minder gemonitord worden en vaak ook minder efficiënt opereren. Dit fenomeen, **carbon leakage**, betekent dat de emissies van Europa dan wel zullen dalen, maar op wereldniveau zelfs zullen toenemen. Daarnaast heeft dit directe grote gevolgen voor de welvaart in Europa en bij uitbreiding Vlaanderen, waar de basisindustrie een zeer belangrijke rol speelt. Europa en Vlaanderen moeten zorgen voor een **gelijkwaardig speelveld** (level playing field) voor importerende en exporterende bedrijven om de concurrentiepositie van EU-bedrijven te handhaven. Dit kan op verschillende manieren die verder onderzocht moeten worden (zie ook het document 'Flankerend Beleid').

Aanwezigheid van voldoende, leveringszekere en competitief geprijsde klimaatneutrale energiedragers en feedstocks is cruciaal om significante CO₂-reducties te realiseren

Om de transitie te kunnen waarmaken zal de industrie o.a. een omschakeling moeten maken naar andere energiedragers en feedstocks. Het is dan ook cruciaal dat het energiesysteem hierop wordt aangepast. De industrie heeft nood aan voldoende, betrouwbare en betaalbare klimaatneutrale energiedragers en feedstocks om de transitie te kunnen realiseren. Hierbij moet rekening gehouden worden met de vraag aan energie die de industrie nodig heeft om efficiëntie en veiligheid te kunnen garanderen. Deze uitdaging is des te groter indien men ook rekening houdt met de noden uit andere sectoren die ook voor een belangrijke transitie staan, maar buiten de scope van deze opdracht vallen (waaronder gebouwen, transport, etc.). Bovendien opereren de Vlaamse bedrijven in een concurrentiële globale context en zal **de beschikbaarheid, betrouwbaarheid en prijs** van energie en feedstock bepalend zijn voor de toekomstige keuzes die ze maken. Hierin zal zowel het voorzien in eigen productie als het verzekeren van voldoende invoer van belang zijn.

Uitbouw van infrastructuur en logistiek voor nieuwe waardeketens

Naast een wijziging in de energiemix zullen ook nieuwe vormen van feedstocks bijdragen aan significante CO₂-reducties. **De aanwezigheid van de nodige infrastructuur en logistiek voor deze nieuwe feedstocks en hun waardeketens is een noodzakelijke voorwaarde voor de transitie**. Zonder de aanwezigheid van deze infrastructuur en logistiek kan de industrie moeilijk grootschalige wijzigingen doorvoeren omdat de beschikbaarheid van energie en feedstock cruciaal zijn.

Er dient infrastructuur (inclusief voor mogelijke sectorkoppeling) te worden uitgebouwd voor CCU/S, CO₂ & H₂ en de bestaande elektriciteitsinfrastructuur moet versterkt worden, vnl. in de industriële clusters. Voor de uitbouw van nieuwe infrastructuur dient er zowel gekeken te worden naar o.a. **transport** via pijpleidingen en via schepen. Er zal heel wat **import** gebeuren van energie en feedstock en dit aspect van infrastructuur dient ook bekeken te worden.

De logistieke ketens voor biomassa en hergebruik van kunststofafval dienen opgezet te worden en barrières hieromtrent dienen weggewerkt te worden. Ook de logistieke ketens voor waterstof/syn-brandstoffen dienen te worden uitgebouwd. Meer details zijn beschreven in het document 'Flankerend beleid'.

Ondersteuning voor de grootschalige toepassing van CO₂-afvang

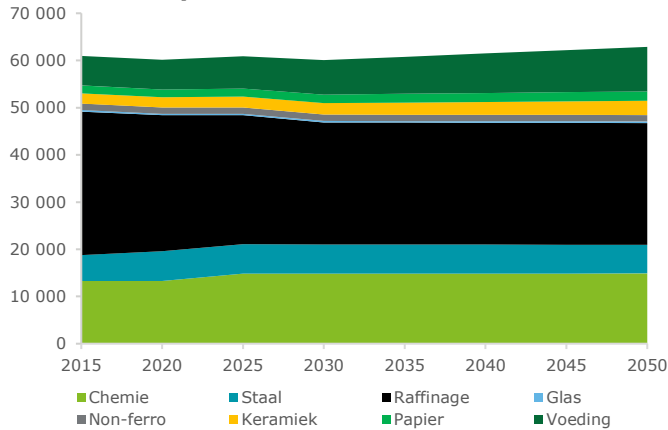
In elk van de gecombineerde scenario's speelt **CO₂-afvang een sleutelrol** in het realiseren van significante reducties tegen 2050. Om dit in de praktijk te kunnen omzetten, is er nood aan voldoende infrastructuur voor transport naar geologische opslaglocaties buiten Vlaanderen (bij voorkeur onder de zeebodem), verdere verbetering van de efficiëntie van de afvangtechnologie en aan een voldoende draagvlak bij de bevolking voor de aanleg van transportinfrastructuur en/of opslag. Vlaanderen beschikt niet over (voldoende) locaties om CO₂ offshore permanent te stockeren. Er moeten dan ook strategische partnerships worden afgesloten met de buurlanden om te verzekeren dat Vlaanderen toegang krijgt tot deze stockagemogelijkheden en dat dit voor zeer lange termijn wordt verzekerd.

Bovenstaande elementen worden in meer detail besproken als aparte randvoorwaarden met bijbehorende suggesties voor beleidsaanbevelingen in 'Leverbaarheid 8 - Flankerend beleid'.

Het is belangrijk om te benadrukken dat **het gehanteerde model geen optimalisatiemodel is, en dat het dus niet automatisch de meest kostenefficiënte route berekent om tot een gewenst resultaat (bv. emissiereducties tegen 2050) te komen (backcasting)**. Het is daarentegen een simulatiemodel, waarbij het eindresultaat en de route daarnaartoe het resultaat zijn van de assumpties en keuzes die de gebruiker invoert (forecasting). Zo laat het toe de impact van variërende assumpties transparant in kaart te brengen.

De onzekerheden rond o.a. timings van implementatie en de uiteindelijke technologiemix zijn groot en nemen toe naarmate er verder in de tijd wordt gekeken. De opgesomde randvoorwaarden zullen hierop een grote invloed hebben. De simulaties in dit rapport dienen dan ook niet gelezen te worden als een voorspelling van de toekomst maar als een verkenning ervan en dienen steeds met de randvoorwaarden in het achterhoofd geïnterpreteerd te worden. De verkenningsscenario's laten toe om bepaalde conclusies te nemen en 'must haves' te bepalen die in elk scenario van belang zullen zijn.

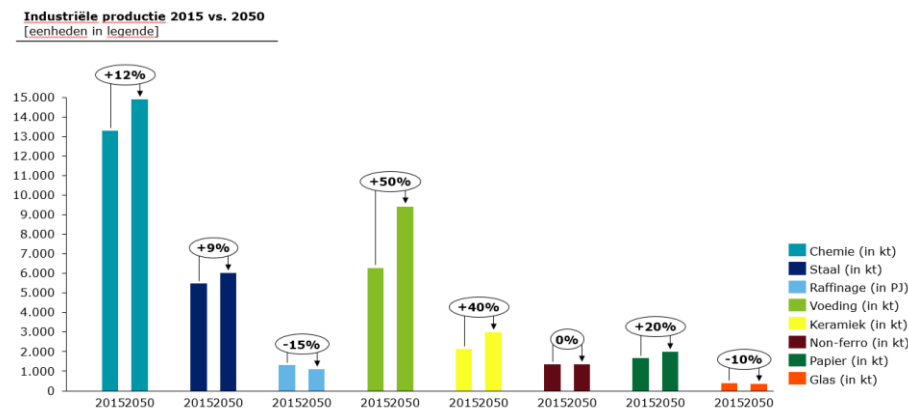
Evolutie van productie



Figuur 15 Productie van verschillende producten (kton).

Bij de analyse wordt rekening gehouden met een **algemeen stijgend productievolume van 3%** naar 2050 toe. Dit wordt voorgesteld per sector in Figuur 15 **Productie van verschillende producten (kton)**.

Onderliggend aan deze totale, beperkte stijging zitten wel belangrijke verschillen tussen de verschillende sectoren, zoals weergegeven in onderstaande Figuur 16 **Evolutie productieniveau 2015-2050 per sector (eenheden in legende)**.



Figuur 16 Evolutie productieniveau 2015-2050 per sector (eenheden in legende).

Er wordt op basis van innoverende technologieën een transitie ingezet richting **nieuwe platformmoleculen ethanol en methanol** welke toelaten een robuuste en flexibele chemische cluster uit te bouwen in Antwerpen of via productie in Gent of Nederland. Hierdoor komt er mogelijk wel een (gedeeltelijke) **ontkoppeling voor nafta tussen de chemie en de petro-raffinage**, waarbij 2040 een belangrijk kantelpunt kan zijn. Daarentegen komt er een mogelijke **sterke koppeling tussen de staalsector en de chemie** doordat gecapteerde restgassen CO en CO₂ uit de hoogovens ingezet worden voor de productie van ethanol en methanol, die vervolgens kunnen worden gebruikt als basisproduct in de HVC-productie, als substituut voor nafta. De ontkoppeling van chemie en petro-raffinage is één mogelijk toekomstscenario, maar de toekomst zal uitwijzen of dit zich zal realiseren. In de varianten verder beschreven is deze ontkoppeling er niet.

Hetzelfde geldt voor de koppeling tussen de staalsector en chemie. Er is een potentieel om deze koppeling te realiseren, maar mogelijk manifesteert de

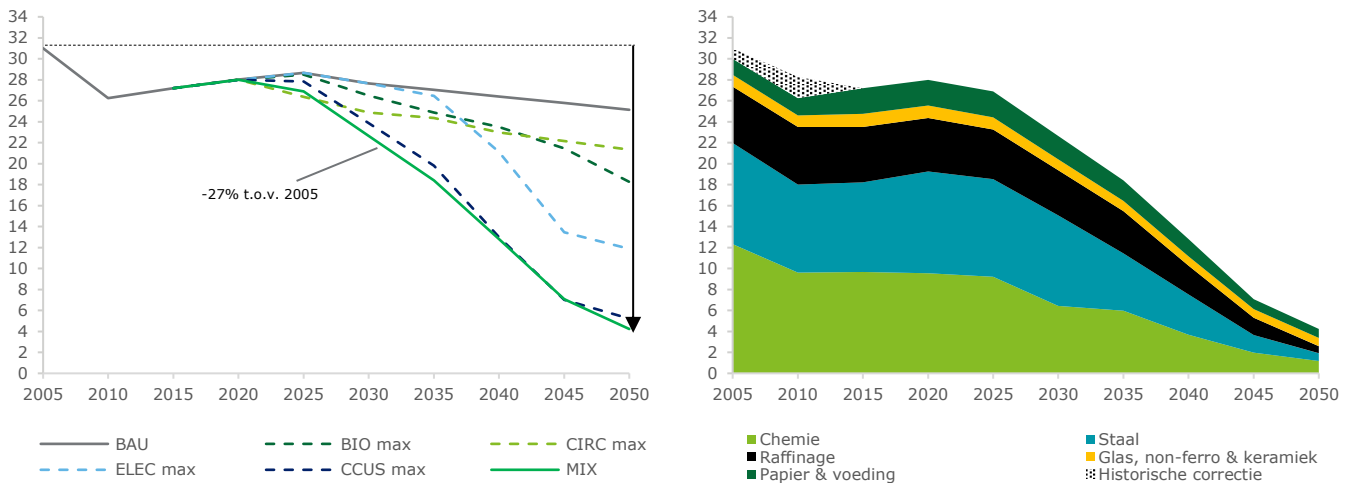
synergie tussen het staalbedrijf met chemische bedrijven net over de grens in Nederland of met de chemiecluster in Antwerpen .

Verder krijgen door het gebruik van innoverende technologieën **gerecycleerde kunststof, biomassa en H₂ een meer prominente rol als energiedrager en/of feedstock.**

De transitie zal er alleszins voor zorgen dat er nieuwe platformmoleculen worden geïntroduceerd, maar ook dat er gebruik gemaakt zal worden van nieuwe feedstocks en energievoorzieningen. Deze veranderingen zullen radicaal ingrijpen bij de bedrijven en er zal een belangrijke rol voor het beleid zijn om dit mee te helpen realiseren door het mee helpen vervullen van belangrijke randvoorwaarden.

Evolutie van emissies

Met de technologiekeuzes onder het verkenningsscenario is het mogelijk om de broeikasgasemissies van de Vlaamse industrie te reduceren met circa 86,4% van de emissies t.o.v. 2005 van 31 Mton broeikasgasemissies naar 4,2 Mton in 2050. De resultaten van het referentiescenario, de vier thematische transitiepaden en het centraal verkenningsscenario worden in Figuur 17 weergegeven. Deze figuur toont aan dat via de thematische transitiepaden (maximale scenario's) CO₂-reducties kunnen worden behaald tegen 2050, maar dat de individuele transitiepaden onderling sterk van elkaar verschillen qua impact. Bovendien heeft ook enkel een combinatie van deze transitiepaden (of een zeer hoge inzet van CC(U)S) het potentieel om significante reducties te verwezenlijken die in lijn liggen met klimaatneutraliteit.



Figuur 17 Centraal verkenningsscenario (MIX) resultaten voor een koolstofcirculaire en CO₂-arme Vlaamse industrie. Daling van de broeikasgasemissies (links) en de respectievelijke emissies uit de sectoren (rechts). Emissies in Mton³⁸.

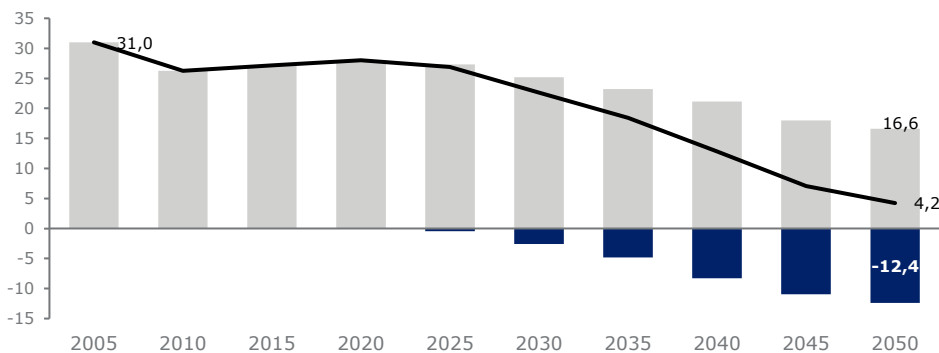
Er wordt beperkte reducties ingeschat in het maximaal circulair scenario (**CIRC max**) en het maximaal biogebaseerd scenario (**BIO max**) waarbij respectievelijk 31% en 41% broeikasgasreducties worden behaald in 2050 (t.o.v. basisjaar 2005). Het maximaal elektrificatie scenario (**ELEC max**) scenario toont aan dat via elektrificatie van processen en het gebruik van H₂ tot 62% reducties kunnen worden behaald in 2050 (basisjaar 2005).

³⁸ N.B. 2005 is gebaseerd op officiële data. Cijfers voor 2010 is een benadering o.b.v. de broeikasgasinventaris, maar het was niet mogelijk om hier een exact cijfers o.b.v. correcte scope te berekenen.

De meeste impact wordt behaald via het maximaal inzetten op CO₂-afvang (**CCUS max**) of in het centraal verkenningsscenario (**MIX**). Deze scenario's realiseren respectievelijk reducties in emissies van 83% en 86,4%.

In de scenario's met significante emissiereducties (zowel CCUS max, MIX en de varianten) is er een belangrijke rol voorzien voor CO₂-afvang. In de scenario's zonder CO₂-afvang worden deze grote reducties niet gerealiseerd. **Dit toont aan dat CO₂-afvang een noodzakelijke voorwaarde is om grote reducties te realiseren in elks van de mogelijke verkenningsscenario's voor de Vlaamse industrie.**

In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) worden de emissies voor 46% gereduceerd door een combinatie van efficiëntieverbeteringen, de overschakeling naar klimaatvriendelijke brandstoffen en de toepassing van nieuwe, innovatie technologieën, en zal er een nood zijn om 12,4 Mton CO_{2eq.} te capteren tegen 2050.



Figuur 18 Applicatie van CO₂-afvang in het centraal verkenningsscenario (MIX) (in Mton). Grijs geeft de bruto emissies weer, via CO₂-afvang (donkerblauw) dalen de netto emissies (cfr. lijn).

CO₂-afvang

CO₂-afvang wordt in de gecombineerde scenario's (het centrale verkenningsscenario **MIX** en de twee varianten) toegepast als sluitstuk voor de roadmap om emissies te reduceren: na toepassing van alle andere reductieopties wordt CO₂-afvang toegepast op de resterende emissies. Daarbij werd voor de drie scenario's gewerkt met eenzelfde 'afvanggraad' (= relatieve aandeel van de resterende emissies die worden afgevangen) per technologie. Deze 'afvanggraad' per technologie werd bepaald op basis van de ligging van bepaalde sectoren en wat volgens wetenschappelijke literatuur haalbaar is afhankelijk van de CO₂-concentratie in de uitstoot:

- De productie van waterstof via de SMR-route en de productie van ammoniak via het Haber-Bosch proces leiden tot reststromen met een zeer hoge concentratie aan CO₂. Voor deze technologieën wordt er in de betrokken scenario's uitgegaan van een hoge afvanggraad (89%). Ook zou afvang reeds starten in 2025 en zou de afvanggraad van 89% reeds vanaf 2030 bereikt worden.
- De productie van primair staal in hoogovens leiden tot reststromen met een middelhoge concentratie aan CO₂. Voor deze technologieën wordt er in de betrokken scenario's uitgegaan van een afvanggraad van 87,5%. De afvang zou starten in 2030 en vanaf 2045 zou de afvanggraad van 87,5% bereikt worden.
- Het raffinageproces en bepaalde HVC-productieprocessen hebben lagere CO₂-concentraties in hun uitstoot. Maar geografisch zijn de emissies wel geconcentreerd in het Antwerps havengebied. Daarom werd er voor deze technologieën in de betrokken scenario's uitgegaan

van een uiteindelijke afvanggraad van 80% tegen 2050. De afvang zou ook later starten (vanaf 2035).

- Ten slotte wordt er ook nog een lagere afvanggraad van 60% toegepast voor de opwekking van middelhoge temperatuurwarmte die voornamelijk wordt verbruikt binnen de chemische waardeketen. Deze lagere afvanggraad houdt rekening met het feit dat deze waardeketens grotendeels maar niet volledig in de grote clusters gelegen zijn, en dus maar gedeeltelijke toegang zouden hebben tot de infrastructuur voor CO₂ transport.
- Voor wat betreft de kleinere sectoren (voeding, papier, keramiek, glas en non-ferro) wordt in de betrokken scenario's geen CO₂-afvang toegepast. Deze sectoren liggen veelal buiten de grote clusters in de havengebieden, en bijgevolg zou het niet efficiënt zijn om voor deze sectoren infrastructuur uit te bouwen voor het transport van de afgevangen CO₂.

Een gevolg van deze toepassing van CO₂-afvang is dat de finale emissiereducties tussen de verschillende gecombineerde scenario's relatief gelijkaardig zijn en dat het grootste verschil zit in de mate waarop deze reducties worden verwezenlijkt door toepassing van CO₂-afvang.

In alle drie de scenario's (1 mix en 2 variaties) wordt er vanaf 2025 CO₂-afvang toegepast, en zouden er tegen 2050 significante volumes CO₂ worden afgevangen (tussen 10 en 14 Mton CO₂teq. per jaar in 2050)³⁹. Deze belangrijke rol voor CO₂-afvang kan verklaard worden vanuit de keuze om bij de opbouw van de scenario's maximaal rekening te houden met behoud van de bestaande waardeketen en geplande investeringen of investeringen die reeds worden uitgevoerd in de Antwerpse haven: hierdoor zullen productietechnologieën op basis van fossiele energiebronnen en feedstocks ook nog in 2050 een belangrijke rol spelen, waarvoor de inzet van CO₂-afvang de enige optie is om significante reducties de verwezenlijken. Ondanks inzet op CCU zou het merendeel van de afgevangen CO₂ getransporteerd moeten kunnen worden voor geologische opslag.

De inzet van CO₂-afvang onder de drie scenario's is erg ambitieus, zowel naar timing als naar volumes toe. De toepassing van CO₂-afvang, transport en opslag bevat immers **een aantal belangrijke uitdagingen**:

1. **Investeringskosten**: het afvangen, transporteren en opslaan van CO₂ vereist significante investeringen in infrastructuur. De vereiste investeringen in CO₂-afvang alleen al worden in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) ingeschat tussen €2 en 4 miljard. De investeringen in transport- en opslaginfastructuur zullen dit bedrag nog verhogen tot een veelvoud. Er is een belangrijke regierol voor de overheid, zowel in Vlaanderen als de EU, weggelegd om de nodige ondersteuning hiervoor te bieden en de business case voor de bedrijven (tijdelijk) positief te maken.
2. **Energieverbruik**: de toepassing van CO₂-afvang (en ook van transport en opslag) leidt tot een bijkomend energieverbruik en dus tot bijkomende energiekosten. Onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**) wordt al uitgegaan van significante efficiëntieverbeteringen van bestaande CO₂-afvang technologieën⁴⁰, maar leidt de inzet van CO₂-afvang alsnog tot een significant energieverbruik van 9,2 TWh/jaar in 2050. Een verdere reductie van

³⁹ In dit hoofdstuk wordt het mix verkenningsscenario in detail besproken. Verdere details van de varianten zijn opgenomen in het hoofdstuk 'Varianten op het centraal verkenningsscenario'. Er is in dit hoofdstuk echter voor geopteerd om af en toe te verwijzen naar de varianten omdat de vergelijking tussen de verschillende scenario's zeer waardevol is.

⁴⁰ Op basis van amine, waarbij er veel warmte nodig is om de geabsorbeerde CO₂ opnieuw te scheiden van de amine.

het energieverbruik is mogelijk via de ontwikkeling van nieuwe afvangtechnologieën.

3. **Opslagcapaciteit:** in Vlaanderen en bij uitbreiding België zijn er weinig geschikte locaties voor de grootschalige opslag van CO₂. Er zal dus ingezet moeten worden op infrastructuur en samenwerking met nabijgelegen landen om de afgevangen CO₂ van de Vlaamse industrie te kunnen transporteren naar de opslaglocaties. Momenteel onderzoeken verschillende projecten al de mogelijkheid voor transport en opslag in de Noordzee voor de kust van Nederland⁴¹ en Noorwegen⁴², maar ook andere locaties (bv. kust voor Schotland) tonen potentieel. Een andere mogelijke optie is om afgevangen CO₂ te transporteren naar gebieden met veel potentieel voor groene H₂ productie, waar deze kan gebruikt worden voor de productie van synthetische brandstoffen die daarna opnieuw worden ingevoerd in Vlaanderen.
4. **Publieke acceptatie:** hoewel het transport van CO₂ mits de nodige voorzorgsmaatregelen op een veilige manier kan gebeuren, leert de ervaring in andere landen dat publieke acceptatie een uitdaging kan zijn, zowel voor opslag als voor transport over land.

Omwille van deze uitdagingen wordt er onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**) naar gestreefd om de afhankelijkheid van CCS te beperken, door in te zetten op emissievrije productieprocessen en energiedragers, en door afgevangen CO₂ zoveel mogelijk te hergebruiken via CCU technologieën. **Niettemin toont de analyse aan dat het afvangen, transporteren en geologisch opslagen van CO₂ (CCS) hoe dan ook een sleutelrol zal moeten spelen om significante reducties tegen 2050 te verwezenlijken.**

Anderzijds is er vastgesteld dat de betrokken stakeholders in Vlaanderen eveneens veel potentieel zien in CO₂-afvang, en ambities vooropstellen die in lijn liggen of zelfs nog ambitieuzer zijn dan de ontwikkelingen onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**):

- Het **Antwerp@C** project is een samenwerking tussen 8 bedrijven die actief zijn in het Antwerpse havengebied, waaronder bedrijven met een hoge uitstoot (grote chemische installaties en raffinaderijen). Hun ambitie is om tegen 2030 tot de helft van de emissies in de Antwerpse haven af te vangen, wat neerkomt op ongeveer 9 Mton CO_{2eq}.⁴³ De vroegste gedeeltelijke start van het project zou in 2024 kunnen zijn.
- **North Sea Port**, deels gelegen in het Gentse havengebied en Terneuzen in Nederland, onderzoekt ook de mogelijkheden om CO₂-afvang te realiseren, als mogelijk te hergebruiken, maar in eerste instantie geologisch op te slaan. Er zijn 12 bedrijven, waarvan 6 Vlaamse, betrokken in het onderzoek die actief zijn in o.a. de chemische, staal-, voeding- en papiersector⁴⁴ (Carbon Connect Delta).

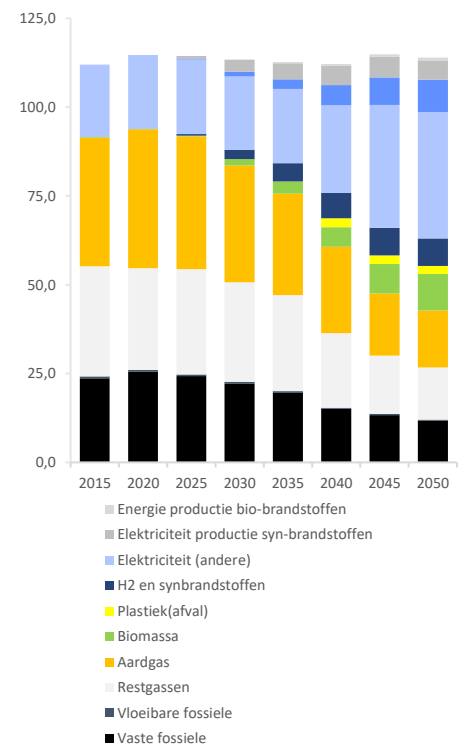
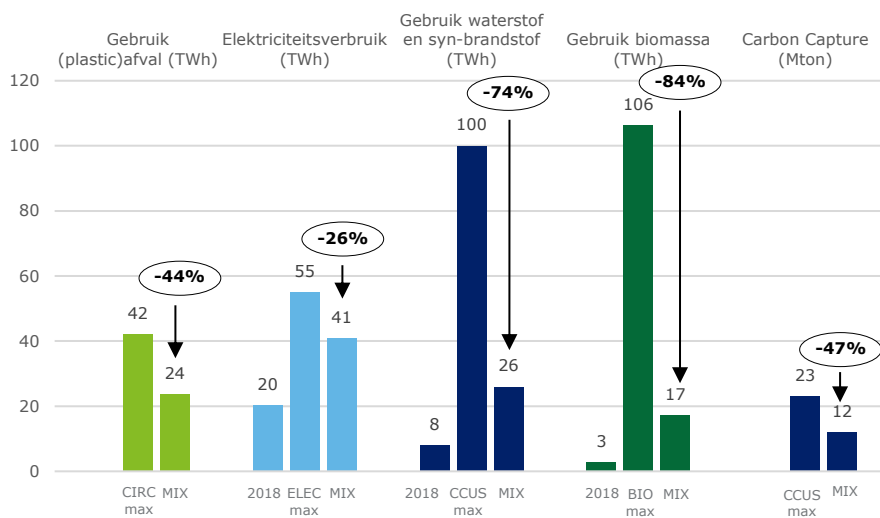
⁴¹ Zie het CO₂TransPorts project: <https://vlaandereninnederland.be/havens-rotterdam-antwerpen-en-north-sea-port-willen-samen-co2-opslaan>

⁴² Zie het Northern Lights project: <https://northernlightsccs.com/en/about>

⁴³ <https://newsroom.portofantwerp.com/antwerpc-onderzoekt-potentieel-om-de-co2-uitstoot-in-de-haven-van-antwerpen-tegen-2030-te-halveren>

⁴⁴ <https://en.northseaport.com/possible-eu-subsidy-for-international-co2-storage-cooperation>

Evolutie van energievraag⁴⁵ en feedstock



Figuur 19 Ondanks dat het MIX-scenario de meeste broeikasgasreducties realiseert vermindert het ook de afhankelijkheid van individuele toepassingen (als energie en als feedstock) (links), en de energievraag naar verschillende brandstoffen (TWh) (rechts).

In het verkenningsscenario is er **een lichte daling** van de finale **energievraag** van **--3,8%** tegen 2050 (t.o.v. 2015)⁴⁶. Dit komt door een combinatie van een aantal evoluties:

- Enerzijds leiden verdere efficiëntieverbeteringen binnen bestaande technologieën tot een daling van de energievraag⁴⁷. Ook vragen bepaalde nieuwe technologieën minder energie dan bestaande technologieën die worden vervangen.
- Anderzijds worden er in het verkenningsscenario ook nieuwe technologieën ingezet die leiden tot een hogere of bijkomende energievraag, in het bijzonder het afvangen van CO₂-emissies (carbon capture).
- Ten slotte is er sprake van een zekere mate van elektrificatie, en wordt de primaire energie-input om deze elektriciteit te produceren niet mee in rekening genomen.

Verder is er ook sprake van een belangrijke shift in het type energiedragers. Zo daalt het aandeel van fossiele energiedragers (in het bijzonder steenkool in de staalsector en aardgas en restgassen in de overige sectoren). Anderzijds zal er een groei zijn in de vraag naar energiedragers om de industrie koolstofcirculair en CO₂-arm te krijgen, namelijk:

- Het **elektriciteitsverbruik stijgt met circa 145%** van 20,5 TWh in 2015 naar 50 TWh in 2050 wegens de combinatie van elektrificatie van processen (+15,2 TWh), de productie van syn-brandstoffen (+5,3 TWh), alsook het elektriciteitsverbruik gelinkt aan CO₂-afvang

⁴⁵ Energie kan worden uitgedrukt in TWh of PJ (1 TWh = 3,6 PJ).

⁴⁶ Inclusief het totale verbruik van bio- en syn-brandstoffen. Deze bio- en syn-brandstoffen worden in de modelering deels geïmporteerd, deels geproduceerd in Vlaanderen. Het energieverbruik voor de productie binnen Vlaanderen is niet meegenomen voor de berekening van het finale energieverbruik, maar is voor de volledigheid wel opgenomen in figuur 19 onder de categorieën "electriciteit (productie syn-brandstof)" en "energie productie bio-brandstof"

⁴⁷ Cefic (2019). European chemistry for growth. Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future.

(+9,1 TWh). Het gebruik van **H₂ en syn-brandstoffen voor energiedoelinden** stijgt tot 7,8 TWh in 2050⁴⁸.

- De **vraag naar biomassa voor energiedoelinden** in de industrie stijgt van 2,8 TWh (10,1 PJ) in 2018 naar 10,3 TWh (37,1 PJ) in 2050. Het merendeel hiervan (7,1 TWh) heeft betrekking op valorisatie van houtafval (bijv. voor de staalproductie) en valorisatie van reststromen bij processen die biomassa voornamelijk als feedstock gebruiken.
- De inzet van (kunststof) afval voor energiedoelinden wordt maximaal vermeden. Het verbruik van 2,3 TWh zoals weergegeven in Figuur 19 (rechts) heeft betrekking op de inzet van afval voor de productie van primair staal (via de IGAR technologie). Via plasma gassificatie wordt kunststofafval omgezet in syngas (CO+H₂), dat vervolgens wordt ingezet in de hoogovens. Dit syngas levert energie en treedt tegelijkertijd op als reductiemiddel.

Een gelijkaardig beeld tekent zich af voor wat het feedstockverbruik betreft. Onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**) **daalt het totale feedstockverbruik met 14% tussen 2015 en 2050** door een combinatie van efficiëntieverbeteringen binnen bestaande technologieën, en de overschakeling naar technologieën met een lager feedstockverbruik (uitgedrukt in energie-inhoud). Tevens vindt er **een shift plaats van fossiele feedstocks naar alternatieve feedstocks zoals H₂** (zowel in pure vorm als verwerkt in methanol en ethanol), biomassa en kunststofafval.

Indien wordt gekeken naar zowel het energetische als niet-energetische verbruik, zien we de vraag naar alternatieve energiedragers zich als volgt ontwikkelen:

- De **vraag naar biomassa in de industrie verzesvoudigt** van 3 TWh (10,8 PJ) in 2018 naar 17 TWh (61,2 PJ) in 2050. Dit komt overeen met inschattingen die gemaakt worden voor Europa⁴⁹. Ten opzichte van maximaal biogebaseerd scenario (**BIO max**) ligt de vraag naar biomassa in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) 84% lager.
- De **vraag naar kunststofafval stijgt tot 2 Mton per jaar** (24 TWh) in 2050. Ten opzichte van het maximaal circulair scenario (**CIRC max**) ligt de vraag naar kunststofafval in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) 44% lager.
- Het gebruik van **H₂ en synthetische brandstoffen verdrievoudigt** van 8 TWh in 2018 naar 26 TWh in 2050. Ten opzichte van het maximaal CO₂-afvang scenario (**CCUS max**) ligt het totale verbruik van H₂ en syn-brandstoffen in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) 74% lager.

Verder zal het gebruik van (vaste, vloeibare, rest-) **fossiele brandstoffen** en met name aardgas **dalen met 53%**. Dit komt door verbeterde efficiëntie, en het gebruik van alternatieve brandstoffen (biogebaseerde en syn-brandstoffen) en elektrificatie.

De hoeveelheid **opgevangen CO₂** per jaar in 2050 wordt in het centraal verkenningsscenario **ingeschat op 12,4 Mton**. Ten opzichte van het maximaal Carbon Capture scenario (**CCUS max**) ligt de opvang van CO₂-emissies 4% lager.

⁴⁸ Inclusief het gebruik van H₂ in de hoogovens van de staalsector te gedeeltelijke vervanging van steenkool.

⁴⁹ Cefic (2019). European chemistry for growth. Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future.

CAPEX/OPEX

De transitie zal leiden tot **hoge investeringsnoden** voor zowel de overheid als private ondernemingen in de Vlaamse industrie. Het totale kostenplaatje kan in het kader van deze studie niet worden ingeschat, enerzijds door een gebrek aan data, maar tevens omdat de scope van deze opdracht maar een beperkt deel van de transitie afdekt.

De verschillende componenten van investeringsnoden zijn als volgt:

- Investeringsnoden in de energieproductie en het energiesysteem (buiten de scope van onze opdracht - niet berekend, maar de verwachting is wel dat dit aanzienlijk zal zijn).⁵⁰ Dit is wel onrechtstreeks opgenomen in de OPEX inschattingen via de elektriciteitsprijs (die stijgt omwille van de assumptie dat de investeringen in het elektriciteitssysteem integraal worden doorgerekend).
- Uitrol van nieuwe productietechnologieën (inschatting gemaakt).
- Kosten voor CO₂ afvang (inschatting gemaakt).
- Investeringsnoden om het huidige productiepark op peil te houden tot en met 2050 (onderhoud en renovatie/vervanging van huidige productiepark)⁵¹ (niet berekend wegens gebrek aan data).
- Investeringsnoden voor (publieke) infrastructuur, waaronder transportnetwerken voor H₂ en CO₂-transport, opslag van CO₂ en importnetwerken (niet berekend daar dit sterk afhankelijk is van de dimensionering van deze infrastructuur en zeer tracé-afhankelijk).

Voor wat het aandeel van vereiste investeringen (CAPEX) voor de implementatie van de gekozen klimaatneutrale technologieën betreft, worden deze ingeschat tussen €12 en 18 miljard⁵² tussen nu en 2050, waarvan tussen €6 tot 9 miljard in de toepassing van nieuwe productietechnologieën en €2 tot 7,5 miljard voor CO₂-afvang (excl. transport en opslag)⁵³.

De toepassing van nieuwe productietechnologieën wordt geschat tussen de €6 tot 9 miljard en is als volgt opgesplitst:

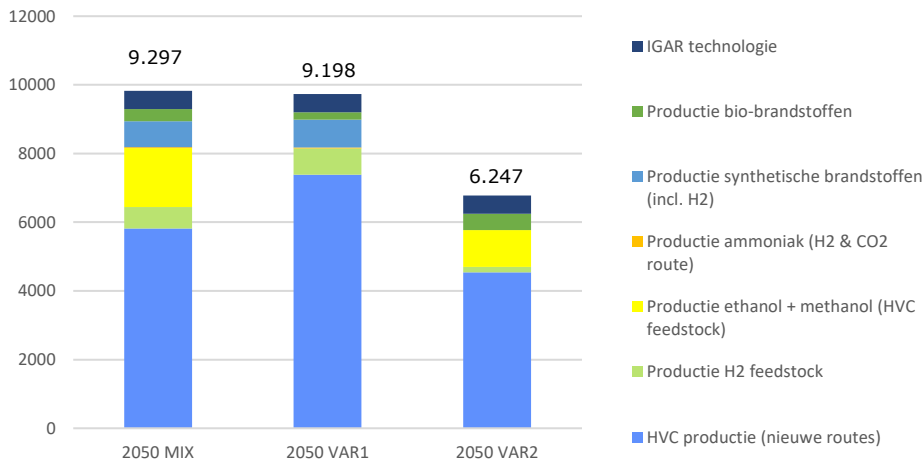
- Het gros van investeringen in nieuwe HVC productieprocessen: rond €6 en €7 miljard en MIX en Var1, iets minder (€ 4,5 miljard) onder Var2 waar meer wordt vastgehouden aan bestaande technologieën gestuwd door de energieprijzen.
- Daarnaast ook tussen €750 miljoen en €2,3 miljard voor productie H₂ en ethanol/methanol als feedstocks.
- Verder ook tussen €750 en €800 miljoen voor de productie van syn-fuels, en tot €500 miljoen voor productie van bio-brandstoffen (dit is sterk afhankelijk van mate van import).
- Bij benadering €500 miljoen voor toepassing IGAR technologie in staalsector.
- Alle CAPEX inschattingen zijn inschattingen o.b.v. greenfields. Brownfield conversies worden niet meegenomen, daar deze zeer locatiespecifiek zijn. Dit kan de kosten nog verhogen.

⁵⁰ De VNCI 'Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050' van Ecofys en Berenschot (2018) schat in dat van € 63 miljard voor de transitie van de Nederlandse chemische industrie, meer dan de helft (€ 37 miljard) in de energiesector zit.

⁵¹ omdat er onvoldoende info beschikbaar is over de vereiste investeringen hiervoor

⁵² Alle bedragen zijn uitgedrukt in €2015 – de bedragen zijn niet verdisconteerd.

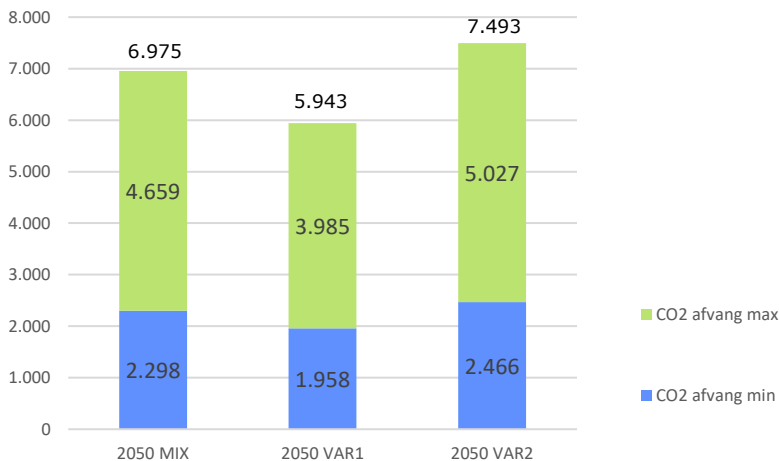
⁵³ Deze brede range voor CO₂-afvang komt door zeer sterk uiteenlopende inschattingen in de geraadpleegde wetenschappelijke bronnen. Zie ook Appendix D.



Figuur 20 Totale CAPEX in nieuwe productietechnologieën in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in EUR2015 miljoen)

Er zijn nog grote onzekerheden rond de kosten voor CO₂-afvang en in de literatuur is er ook een brede range terug te vinden (zie Appendix D). De ingeschatte kosten voor CO₂-afvang bevinden zich tussen de €2 tot 7,5 miljard en is als volgt opgesplitst:

- Voor 2030 is er al €500 miljoen tot €1,5 miljard nodig om hoge concentratie CO₂ van ammoniak- en waterstofproductie af te vangen.
- De inschatting van de kosten is afhankelijk van de finale technologiemix: hoe minder nieuwe klimaatneutrale technologieën zullen worden geïmplementeerd door de industrie, hoe meer investeringen er nodig zullen zijn voor CO₂-afvang op te voldoen aan de doelstellingen van de EU.
- De inschatting betreft enkel kosten voor CO₂-afvang, transport en opslag van CO₂ zijn niet meegenomen in de inschatting.



Figuur 21 Totale CAPEX in CO₂ afvangcapaciteit (exclusief transport & opslag) in het centraal verkenningsscenario en de twee varianten (Var1 en Var2) (in EUR2015 miljoen)

De investeringsnoden (CAPEX) voor de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën onder de eerste variant (Var1) liggen op een gelijkaardig niveau als onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**). De hogere investeringen in elektrificatietechnologieën (+ €3 miljard t.o.v. **MIX**) worden gecompenseerd door lagere investeringen in andere technologieën en in het bijzonder de waardeketen voor HVC-productie o.b.v. ethanol en methanol (-€2,5 miljard t.o.v. **MIX**). Ook de benodigde investeringen in CO₂-afvang technologie liggen iets lager (+/- €300 tot €650 miljoen).

Voor de tweede variant (Var2) liggen de investeringsnoden in nieuwe productiecapaciteit significant lager dan onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**) (-€3 miljard). In werkelijkheid zou de kloof wellicht kleiner zijn, gezien ook het behoud van bestaande productie-installaties bepaalde investeringen vergt voor onderhoud en refurbishment. Anderzijds liggen de investeringskosten voor CO₂ afvangcapaciteit hoger, en zullen ook de kosten voor CO₂ transport en opslag hoger liggen.

Bovenstaande cijfers zijn **geen** weergave van de additionele investeringen t.o.v. het BAU scenario. Door in te zetten op nieuwe productiecapaciteit, zullen bepaalde investeringen voor het onderhoud en de refurbishment van bestaande installaties onder 'business-as-usual' vermeden worden onder de verkenningsscenario's en deze vermeden investeringen worden niet mee in rekening gebracht.

Daar bovenop zouden de **jaarlijkse energie- en feedstockkosten** toenemen onder het centrale verkenningsscenario, met ongeveer +64% (ongeveer €3 miljard) in 2050⁵⁴ (Figuur 21). Deze stijging doet zich echter ook voor onder BAU, door de verwachte prijsstijging voor ruwe aardolie en zijn afgeleide producten (voornamelijk nafta) zoals verwacht door het Internationaal Energieagentschap. De kosten stijgen enigzins minder sterk onder de twee varianten, waar er werd uitgegaan van minder sterke prijsstijgingen voor bepaalde energiedragers en een technologiekeuze i.f.v. deze prijzen.

⁵⁴ Exclusief de import van ruwe olie. Voor wat betreft nafta en LPG wordt enkel de kost van import (verschil tussen vraag vanuit chemie en aanbod vanuit de Vlaamse raffinaderijen) in rekening genomen. Vanaf 2040 zou het aanbod aan nafta uit de raffinaderijen hoger liggen dan de vraag vanuit de chemie: de opbrengst van een eventuele export van deze nafta is niet mee in rekening genomen.

De **emissiekosten**⁵⁵ zouden ondanks sterke reducties alsnog stijgen, van +15% (Var1) tot een verdubbeling onder MIX en Var2 in 2050. Dit komt omwille van een hoge veronderstelde CO₂ prijs van 300 euro/ton CO₂ in 2050⁵⁶. Zonder reductiemaatregelen zouden de emissiekosten onder het **BAU**-scenario meer dan vertienvoudigen, tot bijna €7,5 miljard/jaar in 2050. Hieruit wordt duidelijk dat 'Business as Usual' geen haalbare optie is onder een sterke stijging van de koolstofprijs.

De gecombineerde scenario's tonen aan dat significante reducties mogelijk zijn, maar dat de uiteindelijke technologiemix zal bepaald worden door onder meer de energieprijzen, de marktrijpheid van innovatieve technologieën, de business case, de internationale context en beleidskeuzes die dit alles zullen flankeren.

Op een termijn van 30 jaar zijn de onzekerheden inzake de evoluties van energieprijzen (en technologieprijzen) echter te groot om een zinvolle inschatting te maken van welke technologiemix het meest kostenefficiënt is. Net daarom is het belangrijk om voldoende flexibiliteit te voorzien in de Vlaamse industriële roadmap, en geen enkele beloftevolle technologie bij voorbaat uit te sluiten.

Sensitiviteitsanalyse op basis van de energie- en feedstockprijs

Er zijn 2 varianten op het centraal verkenningsscenario (**MIX**) uitgewerkt en gesimuleerd, waarbij de sensitiviteit van toekomstige prijsvariëaties is doorgerekend:

- In een eerste variatie (Var1) zou de elektriciteitsprijs minder en de prijs van fossiele energiedragers meer stijgen t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**). Hieruit volgend wordt er meer ingezet op elektrificatie technologieën, en minder op fossiele energiedragers in combinatie met carbon capture.
- In een tweede variatie (Var2) zou de elektriciteitsprijs meer stijgen t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**) en de prijs van fossiele energiedragers dalen t.o.v. de huidige prijzen. Hieruit volgend wordt er minder ingezet op elektrificatietechnologieën, en meer op fossiele energiedragers in combinatie met carbon capture.

De resultaten van deze varianten worden verder toegelicht in een apart hoofdstuk ('Varianten') en Appendix D.

De rest van dit hoofdstuk zal nu verder per sector kijken wat de details zijn van het centraal verkenningsscenario (**MIX**). Hierbij worden volgende onderdelen per sector doorlopen:

- Samenvatting voor de sector.
- Productievolumes.
- Evolutie in emissies.
- Evolutie van energievraag en feedstock.
- Evolutie technologie-aandeel.
- Routes en technologische innovaties.

⁵⁵ Hierbij wordt geen rekening gehouden met huidige en toekomstige compenserende maatregelen, zoals bijv. de kosteloze toewijzing van emissierechten.

⁵⁶ €300/ton in 2050, de gemiddelde waarde van de lange termijn scenario's van de Europese Commissie.

- CAPEX voor de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën.

Chemie

	Technologieën	Brandstof	CO ₂ -opvang (CC)
HVC	<ul style="list-style-type: none"> 15% ethaan stoomkraken 24% propaan dehydrogenatie 61% nafta stoomkrakers (vanaf 2035 volledig vervangen door alternatieve routes). 	<ul style="list-style-type: none"> Geen wijziging 	<ul style="list-style-type: none"> 80% CC (begint 2035 met lineaire groei tot 80% in 2050)
Ammoniak	<ul style="list-style-type: none"> 40% vervanging van Haber-Bosch met CO₂-arme technologieën (H₂ en N₂) (vanaf 2035) 	<ul style="list-style-type: none"> 20% van energetisch aardgas naar elektriciteit (Haber-Bosch) 25% van energetisch aardgas naar syn-brandstoffen (voor energie) 	<ul style="list-style-type: none"> 89% CC (begint 2025 met uiteindelijk 89% in 2030)
Chloor	<ul style="list-style-type: none"> Één technologie (zie Appendix A) 	<ul style="list-style-type: none"> 20% van aardgas naar elektriciteit 25% van fossiele brandstof naar syn-brandstof 	<ul style="list-style-type: none"> Geen CC
H₂	<ul style="list-style-type: none"> 44% SMR + CO₂-opvang 41% elektrolyse (vanaf 2025) 15% methaanpyrolyse (vanaf 2035) 	<ul style="list-style-type: none"> Geen wijziging (komt indirect via de technologie mix) 	<ul style="list-style-type: none"> 89% CC SMR-uitstoot (begint 2025 met uiteindelijk 89% in 2050)
CO	<ul style="list-style-type: none"> 50% via DMR 50% via plastic gassificatie 	<ul style="list-style-type: none"> Geen wijziging (komt indirect via de technologie mix) 	<ul style="list-style-type: none"> 80% CC plastic gassificatie (begint 2035)
Ethanol	<ul style="list-style-type: none"> 65% Steelanol-route (binnenlandse productie) 22% twee generatie bio-ethanol (binnenlandse productie) 13% via import 	<ul style="list-style-type: none"> Geen wijziging (komt indirect via de technologie mix) 	<ul style="list-style-type: none"> 80% CC Steelanol (begint 2035 met uiteindelijk 80% in 2045)
Methanol	<ul style="list-style-type: none"> 100% gebaseerd op syngas (vanaf 2035 maar wordt geleidelijk vervangen): <ul style="list-style-type: none"> 25% van methanol via biomassa 50% van methanol via CCU 	<ul style="list-style-type: none"> Geen wijziging 	<ul style="list-style-type: none"> Geen CC (reeds toegepast in de emissies die vrijkomen bij H₂-productie)

Figuur 22 Overzicht implicaties voor de chemie.

Samenvatting

Voor de chemiesector wordt er geen enkele technologie-route ex-ante uitgesloten. Er wordt ingezet op een combinatie van verschillende technologie-routes: elektrificatie en H₂, afvang en opslag of hergebruik van CO₂ (CCUS), circulariteit en de inzet van biomassa en biobrandstoffen. De graad van verwezenlijkte innovatie en kostprijs van de technologie alsook de verschillende energiedragers zullen bepalend zijn hoe de toegepaste technologiemix er in 2050 uit zal zien. Er wordt eveneens rekening gehouden met grote geplande en in uitvoering zijnde investeringen in de Antwerpse en Gentse havens.

Naast het centraal verkenningsscenario (**MIX**), worden er twee varianten onderzocht, waarbij een andere technologiemix wordt voorgesteld die getriggerd wordt door de relatieve verhouding van de kostprijs van de energiedragers ten opzichte van elkaar.

Het **centraal verkenningsscenario (MIX)** kan voor de chemie een **broeikasgasreductie realiseren van 90%** tegen 2050 ten opzichte van 2005. De resterende emissies bedragen 1,2 Mton voor de chemie.

In dit centraal verkenningsscenario (**MIX**) wordt rekening gehouden met een koolstofcirculaire en CO₂-arme chemie die focust op een toepassing van **nieuwe platformmoleculen ethanol en methanol**. Er wordt in dit centraal verkenningsscenario voldoende flexibiliteit ingebouwd door ethanol en methanol via verschillende technologieroutes te produceren: **CCU, gerecycleerde kunststof en biomassa**. Dit vermijdt afhankelijkheid van één technologieroute. De aanvoer van additionele H₂, syn-brandstoffen, kunststofafval, biomassa en benodigde elektriciteit in het **MIX**-scenario kunnen waar nodig geïmporteerd worden. De downstream waardeketen zoals polymeren en specialty chemicals zullen door deze transitie beperkt geïmpacteerd worden.

Voor de naftavraag zijn er verschillende scenario's mogelijk. In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) zal er vanaf 2035 een lagere vraag naar nafta zijn. Het jaar 2040 zal een kantelpunt zijn. Terwijl in een van de varianten de hogere de naftavraag in chemie in 2050 blijft bestaan door groter gebruik van elektrische kraakprocessen en/of CCS op bestaande nafta kraken. Dit zal dan bij constante productie ten koste gaan van bijvoorbeeld biogebaseerde HVC en/of CCU-gebaseerde routes. Dit wordt verder toegelicht in de varianten. Voor ethaankraken is de assumptie genomen dat nieuwe aangekondigde investeringen in de Antwerpse haven worden meegenomen en dat deze operationeel blijven tot 2050 (met CO₂-afvang).

Via retrofit kan de bestaande capaciteit van SMR's (methaan stoom reforming) ingezet worden voor de **productie van klimaatvriendelijke H₂ door middel van CO₂-afvang**. Tot 2030 volstaat de huidige SMR-capaciteit om tegemoet te komen aan de vraag naar H₂ en zullen de end-of-pipe emissies gradueel via CCS opgevangen worden⁵⁷. Tegen 2030 wordt er van uitgegaan dat alle SMR's met CO₂-afvang technologie uitgerust worden. Na 2030 neemt de vraag naar H₂ toe door de uitrol van nieuwe, klimaatvriendelijke technologieën en het gebruik van synthetische brandstoffen in andere (sub-)sectoren. De totale vraag naar H₂ verdrievoudigt van 8,2 TWh in 2015 tot 24,9 TWh in 2050). Naast behoud van de bestaande SMR-capaciteit, zal deze hogere vraag ingevuld worden door de productie van H₂ op basis van hernieuwbare energie (via elektrolyse). Tegen 2050 zal deze een gelijkaardig productieniveau hebben als H₂ geproduceerd op basis van aardgas via SMR. De vraag naar H₂ vanuit de staalsector wordt ingevuld via methaanpyrolyse, een emissievrij proces dat naast H₂ ook vaste koolstof produceert dat in hoogovens kan gebruikt worden ter gedeeltelijke vervanging van steenkool. In totaal stijgt de eigen productie van H₂ met 155% tot 20,8TWh.

De resterende nood (4,1 TWh) aan H₂ zal geïmporteerd worden.

Ammoniak en H₂ zullen door toepassing van CO₂-afvang en nieuwe innovatieve technologieën de eerste chemische producten in 2030 zijn die slechts nog beperkte rest CO₂-emissies bij hun productie uitstoten.

Bij de productie van HVC's zal in het centraal verkenningsscenario nafta grotendeels vervangen worden vanaf 2035 door een combinatie van volgende technologieroutes:

- Via chemische recyclage van kunststof.
- Via de MTO/MTA en/of ethanol dehydrogenatie route.
- Via elektrificatie technologieën.
- Via biogebaseerde routes (rechtstreekse inzet van biomassa naast inzet van bio-ethanol en bio-methanol zoals hierboven beschreven).

Er wordt vanuit gegaan dat de resterende HVC-productie o.b.v. in Vlaanderen tegen 2050 zal overschakelen op elektrisch kraken. Verder wordt er bij de productie van HVC's rekening gehouden met de aangekondigde investeringen van Ineos en Borealis in respectievelijk ethaan kraken en propaandehydrogenatie. Gezien deze investeringen pas na 2020 zullen gebeuren, wordt hun productiecapaciteit behouden tot 2050, met toepassing van CO₂-afvang (vanaf 2035).

Bij de productie van **chloor en de andere productgroepen** wordt voornamelijk ingezet op overschakeling naar klimaatvriendelijke

⁵⁷ Mits juiste ondersteuning mogelijke start vanaf 2024

energiedragers (elektriciteit, biobrandstoffen en synthetische brandstoffen), en wordt ook CO₂-afvang toegepast op de resterende emissies.

De realisatie van dit centraal verkenningsscenario is gelinkt aan belangrijke **randvoorwaarden**:

- De graad van verwezenlijkte innovatie, de kostprijs van de technologie, de verschillende marktprijzen van de energiedragers alsook de prijs voor CO₂-emissies zullen bepalend zijn hoe de toegepaste technologiemix er in 2050 uit zal zien.
- De sterk gestegen elektriciteitsvraag, met 130% (van 9,1 TWh in 2015 tot 20,9 TWh in 2050)⁵⁸ Het transmissienetwerk naar de chemische cluster dient dan ook enorm versterkt te worden in de periode 2020-2035 om in deze behoefte te voorzien.
- Om significante emissiereducties te kunnen realiseren in de chemiesector, die voornamelijk in Antwerpen gelokaliseerd is, dient er reeds in de periode 2020-2030 voorzien te worden in infrastructuur voor het transport van CO₂ (naar locaties waar deze gebruikt of geologisch opgeslagen kan worden) voorzien te worden. Na 2030 dient het netwerk van H₂ en CO₂ verder uitgebouwd te worden.
- De logistieke ketens dienen op punt gezet te worden om kunststofafval en biomassa in te zamelen, correct te scheiden, te importeren en te bevoorraden. De opzet van een hub of hubs voor kunststof recycling en biomassa nabij de chemische clusters dient verder onderzocht te worden.

Productievolumes

Er wordt vanuit gegaan dat de **HVC-productie** in de komende vijf jaar zal toenemen door de geplande investeringen van Ineos en Borealis, waarna het niveau stabiliseert vanaf 2025 tot 2050. Er wordt een verhoging in rekening gebracht van 5.100 kton naar 6.650 kton per jaar. Dit is een stijging in totaal met 30%. Concreet betekent dit dat de nieuwe, aangekondigde installaties voor een stuk zorgen voor additionele productie, maar ook (in mindere mate) de HVC-productie uit nafta vervangen.

De **ammoniakproductie** blijft stabiel tot 2050 en bedraagt circa 719 kton.

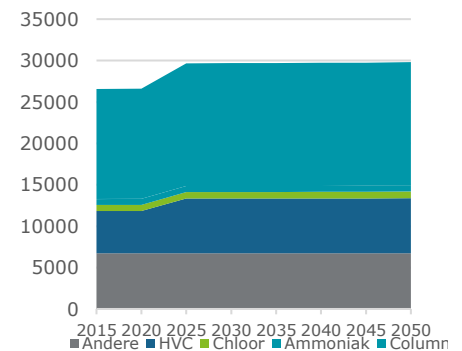
De **chloorproductie** stijgt per jaar 0,6%. In 2015 bedraagt deze 738 kton en deze stijgt in 2050 tot circa 811 kton. Dit is een stijging in totaal met 10%.

De vraag naar andere chemieproducten (afgeleiden van HVC's, ammoniak, en/of chloor) zoals polymeren (plastic), verven, harsen, kunstmeststoffen, pesticiden, zuren, zouten, smeermiddelen, zeep en lijm wordt gecategoriseerd onder **andere** en wordt constant gehouden.

In totaal wordt er voor de chemiesector uitgegaan van een groei van 12% t.o.v. het referentiejaar 2015 door de verhoogde nood aan industriële producten voor transitie in andere sectoren.

Evolutie van emissies

Het centraal verkenningsscenario (**MIX**) leidt voor de chemie tot een reductie van circa 90% van de emissies t.o.v. 2005, ervan uitgaand dat de momenteel beschikbare technologieën met lage TRL's implementeerbaar zijn op deze



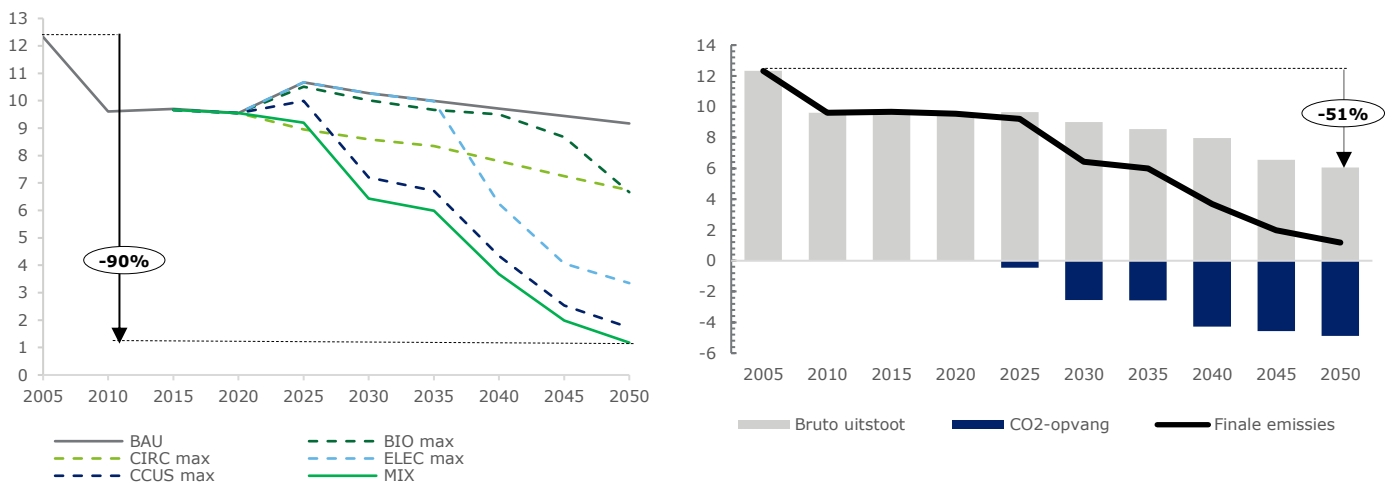
Figuur 23 Evolutie chemieproductie (kton).

⁵⁸ Exclusief de productie van waterstof voor synthetische brandstoffen die in verschillende industriële sectoren zullen worden geconsumeerd.

termijn en economisch rendabel worden. Dit is een reductie van 13,3 Mton broeikasgasemissies naar 1,2 Mton in 2050, bij een stijgend productievolume en een algemeen jaarlijkse efficiëntiewinst van 0,8%⁵⁹. Een deel van deze reducties vonden al plaats tussen 2005 en 2010, voornamelijk ten gevolge van de economische recessie, alsook N₂O-reducerende ingrepen.

De resultaten van het referentiescenario, de vier thematische transitiepaden, en het centraal verkenningsscenario worden weergegeven in Figuur 24.

Een belangrijke manier om de CO₂-emissies te reduceren voor de chemiesector is door het inzetten op CO₂-afvang. In het maximaal Carbon Capture scenario (**CCUS max**) wordt een reductie van 87% t.o.v. 2005 bewerkstelligd, voornamelijk door end-of-pipe CO₂-afvang toe te passen op bestaande technologieën: binnen de ammoniak, H₂- en HVC-productie wordt 90% van de restemissies opgevangen. De emissies die voortkomen uit de opwekking van middelhoge temperatuurwarmte voor andere productieprocessen binnen de chemie worden voor 80% afgevangen. In dit scenario is de afhankelijkheid van één type technologie dominant, en zou er tegen 2050 voor de chemie alleen al jaarlijks 13,6 Mton CO_{2eq.} worden afgevangen. Anderzijds zou er tegen 2050 jaarlijks 16 Mton CO_{2eq.} aangewend worden voor de productie van methanol als bouwsteen voor HVC-productie. Ook is er een significante toename in de elektriciteitsbehoefte (een verviervoudiging t.o.v. 2015) door hoge verbruiken voor ethanol- en methanolproductie, maar ook omdat de uitgevoerde simulatie gaat ervan uit dat uitsluitend elektriciteit wordt gebruikt om in de energiebehoefte voor CO₂-afvang te voldoen.



Figuur 24 De broeikasgasreducties uit de verschillende scenario's (links) en de impact van een slimme mix aan technologieën in het centraal verkenningsscenario (rechts) (Mton).⁶⁰

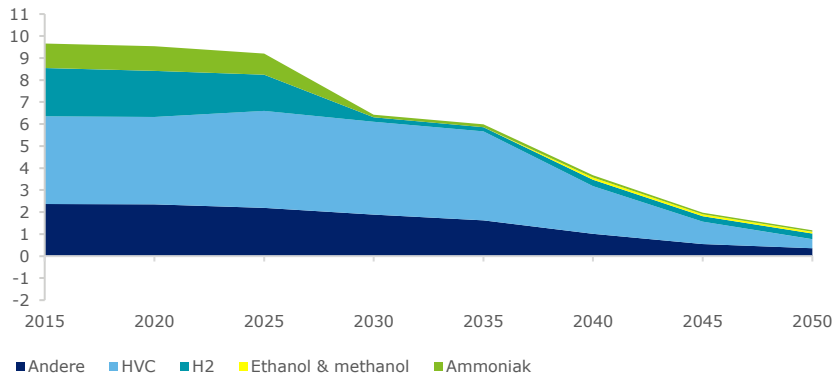
In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) wordt een reductie van 90% bewerkstelligd, ervan uitgaand dat de momenteel beschikbare technologieën met lage TRL's implementeerbaar zijn op deze termijn en economisch rendabel worden. In dit scenario is de afhankelijkheid van CO₂-afvang beperkter. Door een combinatie te gebruiken van efficiëntieverbeteringen,

⁵⁹ M.u.v. warmteconsumptie waar 1,0% is toegepast of bepaalde stochiometrische reacties waarbij geen verbeteringen zijn toegepast.

⁶⁰ N.B. 2005 is gebaseerd op officiële data. Cijfers voor 2010 is een benadering o.b.v. de broeikasgasinventaris, maar het was niet mogelijk om hier een exact cijfers o.b.v. correcte scope te berekenen.

een overschakeling op klimaatvriendelijke brandstoffen, en een overschakeling naar innovatieve technologieën inzake elektrificatie en H₂, circulariteit en biomassa verminderen de broeikasgasemissies met 51% tegen 2050. Daardoor wordt de nood aan CO₂-afvang met 65% verminderd (4,9 Mton i.p.v. 13,6 Mton per jaar) t.o.v. van het **CCUS max** scenario.

In Figuur 25 wordt er een verdere opsplitsing gemaakt in de evolutie van de broeikasgasemissies per productcategorie. Ammoniak en H₂ zullen reeds tegen 2030 sterke reducties in broeikasgasemissies behalen. Deze sectoren genereren immers zeer pure CO₂ stromen, die het meest geschikt zijn voor de toepassing van CO₂-afvang. Voor deze sectoren wordt er dan ook vanuit gegaan dat CO₂-afvang reeds start in 2025 en dat tegen 2030 89% van alle emissies worden afgevangen. Bij de andere productgroepen worden de nieuwe technologieën en CO₂-afvang toegepast vanaf 2035. Deze inschattingen zijn gebaseerd op literair onderzoek, stakeholderbevraging maar ook input van het Antwerp@C-project.

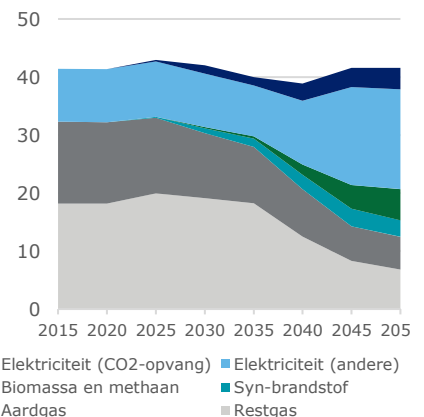


Figuur 25 Productie in de chemie en de bijdrage aan de broeikasgasemissies (Mton) voor het centraal verkenningsscenario.

Evolutie van energievraag en feedstock

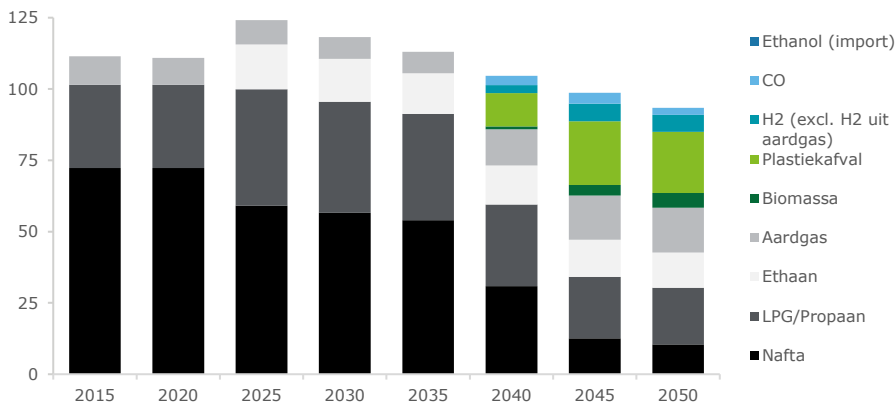
De **totale energiebehoefte** stijgt beperkt met 2,4% in het voorgestelde verkenningsscenario van 41 TWh in 2015 naar 42 TWh in 2050. Daarnaast toont dit ook een sterke verschuiving inzake energiedragers:

- De elektriciteitsvraag stijgt significant van 9,1 TWh in 2015 naar 20,9 TWh in 2050. Deze stijging komt grotendeels door de overschakeling op elektrificatietechnologieën (+8,1 TWh), maar ook omdat als hypothese wordt aangenomen dat alle energievraag voor CO₂-afvang via elektriciteit geleverd wordt (+3,7 TWh).
- Deze stijgende elektriciteitsvraag zal gepaard moeten gaan met een versterking van de infrastructuur.
- Tegen 2050 wordt er binnen de chemie 0,6 TWh aan biomethaan geconsumeerd. Daarnaast stijgt ook de vraag naar biomassa voor energiedoelinden tot 4,6 TWh (= 1,1 Mton) in 2050.
- 2,8 TWh of circa 7% van de totale energiebehoefte kan voldaan worden door een fuel switch naar syn-brandstoffen. Hiervan zal circa 1 TWh geïmporteerd worden.
- Anderzijds daalt het verbruik van aardgas en (fossiele) restgassen met meer dan 60% t.o.v. 2015 tot 12,5 TWh in 2050. Hun aandeel in de totale energiemix in de chemiesector daalt van 80% in 2015 tot 30% in 2050.



Figuur 26 Energieverbruik in de chemie (TWh) in het centraal verkenningsscenario (MIX).

De totale **feedstock** input binnen de chemie stijgt met +12,5% van 111 TWh in 2015 tot 124 TWh in 2025 ten gevolge van de aangekondigde investeringen van Ineos en Borealis. Nadien neemt het feedstock verbruik af tot **93 TWh in 2050, wat 16% lager ligt dan het niveau in 2015**. De voornaamste verklaring hiervoor is de circulaire aanpak binnen de HVC-productie met de overgang van nafta, als belangrijkste feedstock, naar technologieën met andere feedstocks (kunststofafval, biomassa, methanol en ethanol) die – uitgedrukt in TWh – minder feedstock input nodig hebben⁶¹. Door deze transitie van nafta naar de nieuwe platformmoleculen ethanol en methanol, samen met de inzet op chemische recyclage van kunststofafval is de verwachting dat er na 2040 een overschot aan naftaproductie zal ontstaan in Vlaanderen. Dit wordt verder toegelicht in de sectie met betrekking tot de resultaten van de raffinagesector. Naast de omschakeling naar nieuwe platform moleculen zijn er ook andere transitiepaden mogelijk. Deze komen aan bod in de twee varianten, waar deze ontkoppeling minder sterk aanwezig is.



Figuur 27 Feedstockgebruik in de chemie (in TWh)⁶².

Daarnaast zal jaarlijks via het PDH-proces nog 20,0 TWh aan LPG/propan nodig zijn en via het ethanol stoomkraken 12,3 TWh aan ethaan.

Evolutie technologie-aandeel

In de chemiesector worden er verschillende innovatieve CO₂-reducerende technologieën verwacht. Deze worden hieronder per productgroep verder toegelicht. Zie hoofdstuk 'Aanpak' voor de opbouw van het scenario en onderliggende assumpties.

High-Value-Chemicals (HVC's)

In 2025, na realisatie van de capaciteit van de aangekondigde investeringen van Ineos en Borealis, wordt verondersteld dat 61% van de productie via nafta stoomkraken komt, 24% via propan dehydrogenatie (PDH) en 15% via ethaan stoomkraken⁶³. In het voorgestelde verkenningsscenario wordt

⁶¹ Een nafta stoomkraker heeft ongeveer 20 MWh aan nafta input nodig per ton HVC-productie. Voor MTO ligt de feedstock input met ongeveer 16 MWh methanol/ton HVC-productie 20% lager. Ethanol dehydrogenatie ligt ongeveer 12 MWh ethanol/ton HVC-productie 40% lager. De gecombineerde bio-route ligt ten slotte met ongeveer 5 MWh biomassa feedstock input/ton HVC-productie 75% lager dan nafta stoomkrakers.

⁶² Deze figuur bevat geen cijfers voor ethanol en methanol omdat deze op hun beurt uit H₂, CO en biomassa worden geproduceerd. Enkel ethanol import is opgenomen. Voor H₂ is enkel H₂ uit import en elektrolyse opgenomen, omdat de aardgasinput voor de overige H₂ al is opgenomen.

⁶³ Het huidige HVC productie niveau wordt ingeschat op 5,1 Mton per jaar, waarvan 350 kton (7%) via de PDH route en 4.750 Mton (93%) door nafta stoomkrakers. Op

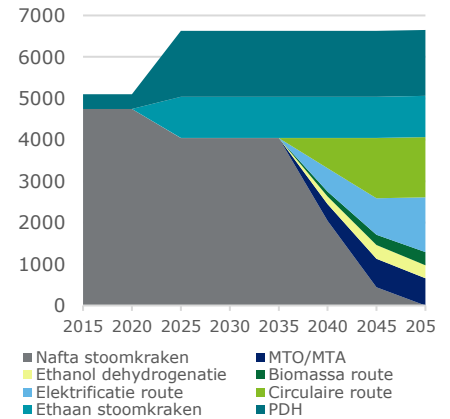
vanaf 2035 overgeschakeld naar een combinatie van technologieën om HVC's te produceren. Daarmee zal in 2050, voor het centraal verkenningsscenario (**MIX**):

- 24% van HVC's via propaandehydrogenatie (PDH) komen.
- 22% van HVC's via chemische recyclage van plastic komen.
- 20% van HVC's via elektrificatie worden geproduceerd.
- 15% van HVC's via ethaan stoomkraken.
- 15% van HVC's via de MTO/MTA en/of ethanol dehydrogenatie route komen (waarbij de ethanol/methanol voornamelijk via CCU-routes worden geproduceerd, en in beperktere mate via biogebaseerde routes).
- 5% van HVC's uit biomassa worden vervaardigd.

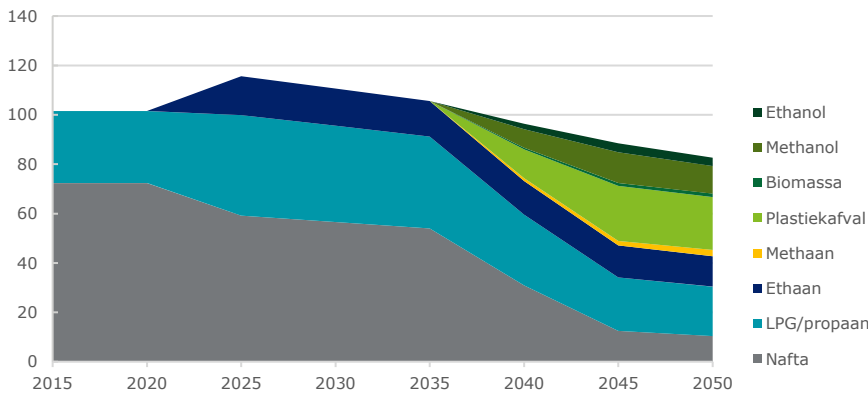
Deze technologiemix heeft ook een belangrijke impact op de feedstockmix voor HVC-productie.

Figuur 29 geeft aan hoe de vraag naar feedstocks zal evolueren in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) naar 2050 toe:

- 1,8 Mton (21,4TWh – 26%) kunststofafval per jaar.
- 0,275 Mton (1,3 TWh – 2%) rechtstreeks biomassaverbruik⁶⁴ per jaar.
- 2,2 Mton (11,2 TWh – 14%) methanol per jaar.
- 0,5 Mton (3,3 TWh – 4%) ethanol per jaar.
- Daarnaast zal jaarlijks via het PDH-proces nog 20,0 TWh aan LPG/propaan nodig zijn en via het ethanol stoomkraken 12,3 TWh aan ethaan.
- Het gebruik van nafta (via elektrificatie-route) zakt tot 10,4 TWh in 2050.



Figuur 28 Aandeel technologieën voor de HVC-productie (kton) in het centraal verkenningsscenario (MIX) .



Figuur 29 In het centraal verkenningsscenario (MIX) neemt de naftavraag af, en wordt deze grotendeels vervangen door plastiekafval, methanol en ethanol (TWh).

Door deze technologiemix is er geen afhankelijkheid van één technologie-route. De aanvoer van additionele H₂, syn-brandstoffen, kunststofafval, biomassa en benodigde elektriciteit wordt in dit scenario, gelet op de randvoorwaarden gepresenteerd in Appendix C, als technisch haalbaar beschouwd en kan waar nodig geïmporteerd worden.

basis van de geschatte productiecapaciteiten van de aangekondigde investeringen in de Antwerpse haven zou het marktaandeel van PDH stijgen tot 24%, en het marktaandeel van ethaan stoomkraken tot 15%. Nafta stoomkrakers zouden het overige marktaandeel van 61% invullen.

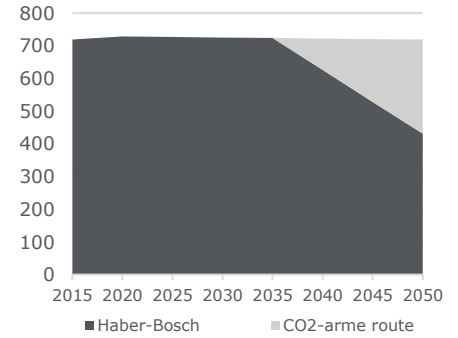
⁶⁴ Exclusief biomassa als feedstock voor ethanol en methanol productie.

Ammoniak

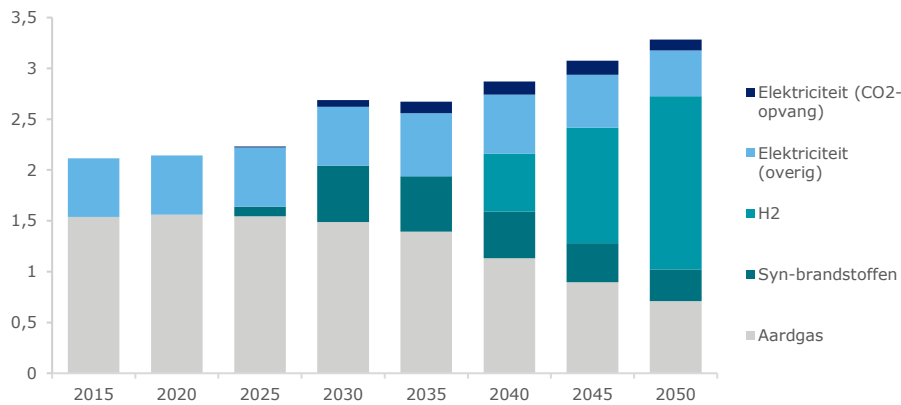
De ammoniakproductie is momenteel gebaseerd op de Haber-Bosch-technologieroute. Deze wordt tegen 2030 voorzien van koolstofafvang met het oog op opslag van CO₂ emissies. Vanaf 2035 wordt de Haber-Bosch route geleidelijk vervangen via een koolstofarme route (met gebruik van H₂-elektrolyse). Uiteindelijk zal tegen 2050 40% van de ammoniakproductie verlopen via de koolstofarme route (o.b.v. electrolyse H₂), en 60% via de Haber-Bosch-techniek met CO₂ afvang. Daarnaast zal 20% van het energieverbruik onder de Haber-Bosch-technologieroute worden geëlektrificeerd tegen 2050 (i.e. minder aardgas) en zal daarbovenop nog eens 25% van het resterende aardgasverbruik voor energiedoeleinden worden vervangen door het gebruik van syn-brandstoffen (niet van toepassing op het aardgasverbruik voor feedstockdoeleinden).

Verder wordt het theoretisch haalbaar geacht dat de toepassing van CO₂-afvang voor ammoniak kan starten vanaf 2025. Om een rol te spelen in reductie van emissies zal ook CO₂ transport en opslag infrastructuur klaar moeten zijn in periode 2025-2030.

Samen genomen zullen de energie-inputs toenemen van 2,1 TWh in 2015 tot 3,3 TWh in 2050.



Figuur 30 Aandeel technologieën voor de HVC-productie (kton) in het centraal verkenningsscenario (MIX).



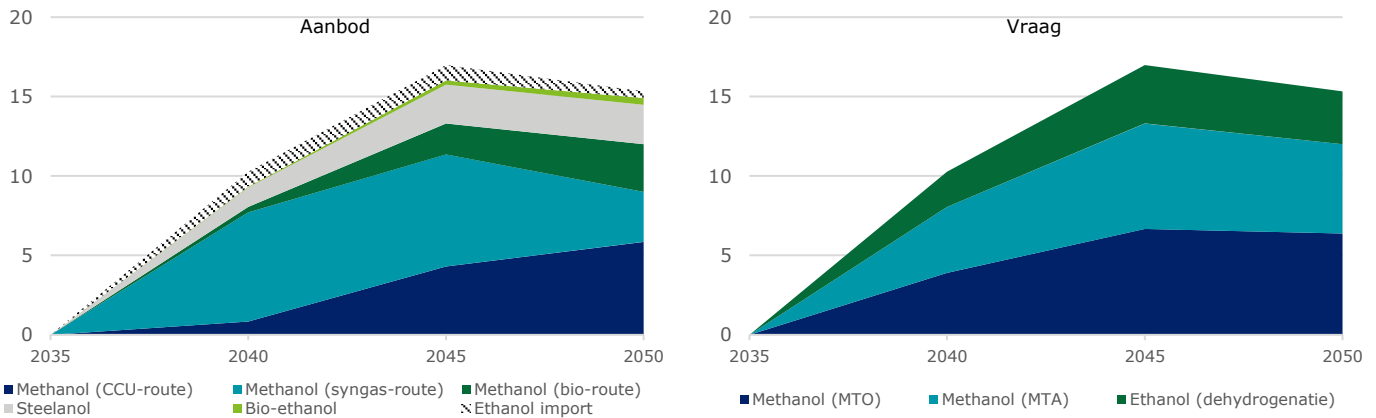
Figuur 31 Inputs voor de ammoniakproductie in het centraal verkenningsscenario (MIX) (in TWh).

Chloor

De productieprocessen gebruikt voor chloor worden voor 20% geëlektrificeerd (i.e. minder aardgasverbruik) en daarenboven wordt nog eens 25% van de fossiele brandstof vervangen door het gebruik van syn-brandstoffen.

Methanol & ethanol

In het centraal verkenningsscenario wordt ingezet op een transitie naar nieuwe platformmoleculen ethanol en methanol. Op basis van het principe van technologie-neutraliteit wordt er voldoende flexibiliteit ingebouwd om deze te produceren via verschillende technologieroutes, namelijk CCU, gerecycleerde kunststof en biomassa. Figuur 32 geeft de stijgende vraag naar methanol en ethanol weer samen met de onderliggende technologieroutes.



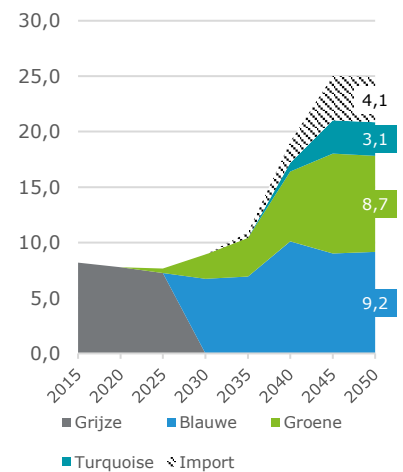
Figuur 32 Methanol en ethanol vraag en aanbod onder het centraal verkenningsscenario (MIX) (in TWh).

H₂

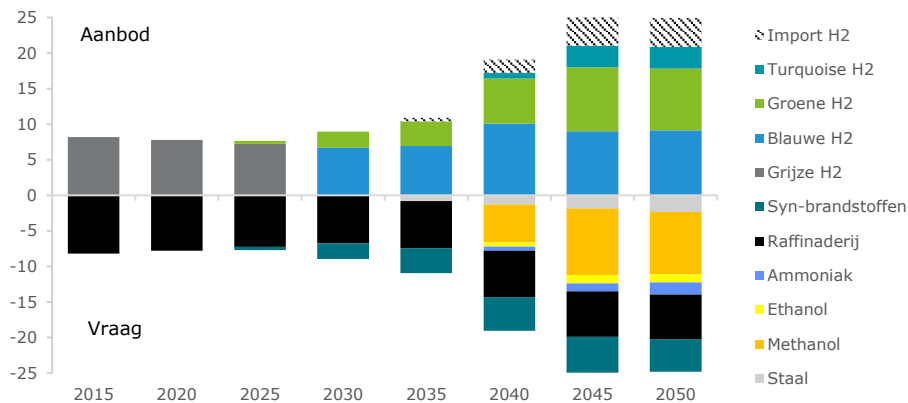
Onder het verkenningsscenario verdrievoudigt de vraag naar H₂, van 8,2 TWh in 2015 naar 24,9 TWh in 2050 (waarvan 4,7 TWh als feedstock voor de productie van syn-brandstoffen, en 20,2 TWh als feedstock in de verschillende sectoren).

De huidige productiecapaciteit voor H₂ (via Methaan Stoom Reforming) wordt behouden en tussen 2025 en 2030 uitgerust met CO₂-afvang technologie. De stijgende vraag na 2030 wordt verder opgevangen door een combinatie van bijkomende productie via uitstootvrije technologieën (voornamelijk elektrolyse maar ook methaanpyrolyse) en H₂-import. In het centraal verkenningsscenario (MIX) is de binnenlandse productie als volgt:

- 44% zal blauwe H₂ zijn op basis van SMR in combinatie met CO₂-afvang. Deze zal de grijze H₂ tegen 2030 vervangen. Vanaf 2025 zal er CO₂-afvang toegepast worden. Deze zal lineair toenemen om zo uiteindelijk 89% van de broeikasgasemissies end-of-pipe van SMR-installaties in 2030 op te vangen.
- 41% zal groene H₂ zijn (via elektrolyse uit kleine pilots tussen 2020-2030 (zoals power-to-methanol), en vanaf 2030 zullen grotere industriële toepassingen (wegens de grotere vraag naar syn-brandstoffen en synthetische methanolproductie) gerealiseerd worden.
- 15% zal turquoise H₂ zijn (via methaanpyrolyse, die vanaf 2035 begint, met voornamelijk als uiteindelijke toepassing in de staalsector).



Figuur 33 H₂-productie en -import per type H₂ volgens het model (TWh).



Figuur 34 Aanbod en vraag naar H₂ onder het centraal verkenningsscenario (MIX) (in TWh).

Routes en technologische innovaties

De **huidige toepassingen** van technologieën in de chemiesector zijn als volgt:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9	
Product	HVC	Referentie	Nafta stroomkraken	9	-
			Ethaan stroomkraken	9	-
			Propaan dehydrogenatie (PDH)	9	-
	Ammoniak	Referentie	Haber-Bosch	9	-
	Chloor	Referentie	Elektrolyse	9	-
	Andere	Referentie	Boiler op brandstof (warmte)	9	-
Feedstock	Methanol	Referentie	Niet van toepassing	-	-
	Ethanol	Referentie	Niet van toepassing	-	-
	H ₂	Referentie	Methaan stoom reforming (SMR)	9	-
	Warmte (medium temperatuur)	Referentie	Boiler op brandstof (warmte)	9	-

Tabel 2 Huidige technologieën toegepast in de Vlaamse chemiesector.

Volgende technologieën zijn verder **gesimuleerd** in het centraal verkenningsscenario, in combinatie met huidige technologieën:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9	
Product	HVC	Elektrificatie	Schokgolftreactor	3-5	2035
			Ethaan oxy-hydratatie	3-4	2035
			Oxidatieve methaankoppeling	4	2035
		Circulair	Chemolyse van plasticafval	5-9	2030
			Katalytisch kraken van plasticafval	3-5	2035
		Biomassa	Bio-geïntegreerde route (*)	2-4	2035
		Biomassa/ CO ₂ -afvang	Ethanol dehydratatie	9	-
			Methanol-to-Olefins	9	-
			Methanol-to-Aromatics	9	-
	Ammoniak	CO ₂ -afvang	Lage CO ₂ emissie technologie	6-7	2025
Chloor	Elektrificatie	Reeds bestaand	9	-	
Andere/warmte	Elektrificatie	Boiler op elektriciteit (lage T)	9	2020	
		Boiler op elektriciteit (middelhoge T)	7-8	2025	
		Boiler op elektriciteit (hoge T)	3-5	2035	
Feedstock	Methanol	Biomassa	Biogebaseerde methanol	9	-

	CCUS	CO + H2 methanol synthese	9	-
		CO2+H2 methanol synthese	7-8	2030
Ethanol	Biomassa	2 ^e generatie bio-ethanol	7	2030
	CCUS	Steelanol	5-8	2030
H2	Elektrificatie	Elektrolyse (met verbetering efficiëntie in periode 2020-2050)		
		Alkaline	9	-
		PEM	8-9	2025
		SOE	7-8	2030
	CO2-afvang	Methaanpyrolyse (turquoise H2)	3-4	2030
Koolstof	CCUS	Lage concentratie CO2-afvang	5-8	2030
		Hoge concentratie CO2-afvang	7-8	2025
Warmte (medium temperatuur)	Elektrificatie	Boiler op elektriciteit (zie boven 'warmte')	-	-

Tabel 3 Verwachte TRL-niveaus van technologieën in de chemie.

(*) De bio-geïntegreerde route bestaat uit combinatie van omzetting van (hemi)cellulose naar melkzuur en van lignine naar HVC's (vb. fenol en propyleen). Deze combinatie is gekozen omdat zij een hoge koolstof-efficiëntie heeft (i.e. meeste koolstof in biomassa wordt omgezet naar producten). De TRL is lager omwille van de combinatie van de twee processen waarbij de lignine naar HVC omzetting iets verder gevorderd is t.o.v. de omzetting van cellulose naar melkzuur.

De meeste technologieën worden pas industrieel toepasbaar verwacht vanaf 2030. Rekening houdend met de doorlooptijd van investeringsbeslissingen en vergunningen wordt de effectieve implementatie in Vlaanderen eerder verwacht vanaf 2035. Dit is echter afhankelijk van het voldoen aan (economische) randvoorwaarden, die in detail zijn beschreven bij de inleiding van dit hoofdstuk.

Er is een belangrijke rol weggelegd voor innovatie en opschaling om de transitie in de chemiesector te realiseren.

Er zijn volgende opportuniteiten geïdentificeerd voor **verdere innovatie en opschaling van technologieën** binnen Vlaanderen en Europa:

- **CCUS:** Streven naar hogere efficiëntie door het energieverbruik te verminderen: minder dan 2 GJ/ton CO₂ voor hoge concentratie emissies en minder dan 5 GJ/ton CO₂ voor lage concentratie emissies op te vangen. Optimaliseren van procesintegratie om restwarmte te gebruiken voor het afvangproces.
- **CCUS:** Streven naar hogere efficiëntie bij de conversie van CO/CO₂ naar de nieuwe platformmoleculen methanol/ethanol.
- **Bio-based HVC:** Verminderen van de hoeveelheid biomassa nodig om HVC's te maken: van 10 naar 3-4 ton biomassa om 1 ton HVC te produceren op basis van nieuwe innovaties (o.a. lignine en melkzuur).
- **Kunststof recyclage:** Streven naar een efficiënt katalytisch proces van kunststof om een hoog rendement van hergebruik terug naar HVC's te realiseren. Dit rendement wordt geschat op 70%.
- **Elektrisch kraken:** Streven naar een efficiënt elektrisch kraakproces, kan een significante reductie in CO₂-emissies met zich meebrengen (tot 90 %) ten opzichte van de klassieke kraakprocessen en het verminderen van het energieverbruik met de helft ten opzichte van nafta stoomkraakprocessen.

- **Oxidatieve koppeling methaan:** Produceren van HVC uit aardgas door het gebruik van methaan als feedstock. De reductie in CO₂-emissies wordt bereikt door de warmte-integratie die binnen dit proces plaatsvindt.
- **Ethaan oxy-dehydratatie:** Industrieel opschalen van dit katalytisch proces als alternatief voor ethaankraken. De theoretische energie efficiëntiewinst bedraagt 35% en emissiereducties 50% ten opzichte van ethaankraken.
- **H₂:** Het verbeteren van de elektrolyse processen (SOE) of andere technologieën om een efficiëntie van 90% te garanderen en de productie van H₂ betaalbaar te maken.
- **Alternatieve syngas productie:** Produceren van methanol via droog methaan reforming.

CAPEX

De transitie zal leiden tot hoge investeringsnoden voor zowel de overheid als private ondernemingen in de chemische sector. Het totale kostenplaatje kan in het kader van deze studie niet worden ingeschat, enerzijds door een gebrek aan data, maar tevens omdat de scope van deze opdracht maar een beperkt deel van de transitie afdekt.

De verschillende componenten van investeringsnoden zijn als volgt:

- Investeringsnoden in de energieproductie en het energiesysteem (buiten de scope van onze opdracht - niet berekend, maar de verwachting is wel dat dit aanzienlijk zal zijn).⁶⁵ Dit is wel onrechtstreeks opgenomen in de OPEX inschattingen via de elektriciteitsprijs (die stijgt omwille van de assumptie dat de investeringen in het elektriciteitssysteem integraal worden doorgerekend).
- Uitrol van nieuwe productietechnologieën (inschatting gemaakt).
- Kosten voor CO₂ afvang (inschatting gemaakt).
- Investeringsnoden om het huidige productiepark op peil te houden tot en met 2050 (onderhoud en renovatie/vervanging van huidige productiepark)⁶⁶ (niet berekend wegens gebrek aan data).
- Investeringsnoden voor (publieke) infrastructuur, waaronder transportnetwerken voor H₂ en CO₂-transport, opslag van CO₂ en importnetwerken (niet berekend daar dit sterk afhankelijk is van de dimensionering van deze infrastructuur en zeer tracé-afhankelijk).

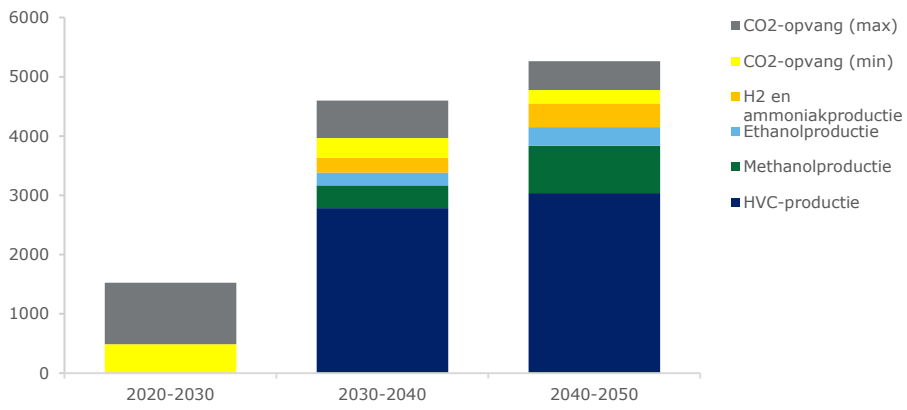
Voor wat het aandeel van vereiste investeringen (CAPEX) voor de implementatie van de gekozen klimaatneutrale technologieën betreft, worden deze ingeschat tussen €9,2 en 12,2 miljard⁶⁷ tussen nu en 2050, waarvan tussen €8,2 miljard in de toepassing van nieuwe productietechnologieën en €1 tot 3 miljard voor CO₂-afvang (excl. transport en opslag)⁶⁸.

⁶⁵ De VNCI 'Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050' van Ecofys en Berenschot (2018) schat in dat van € 63 miljard voor de transitie van de Nederlandse chemische industrie, meer dan de helft (€ 37 miljard) in de energiesector zit.

⁶⁶ omdat er onvoldoende info beschikbaar is over de vereiste investeringen hiervoor

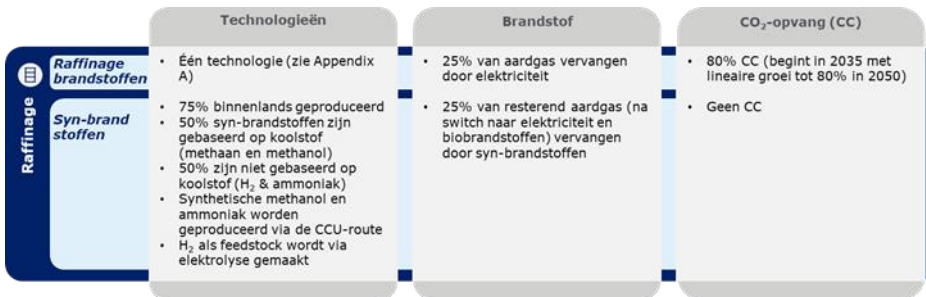
⁶⁷ Alle bedragen zijn uitgedrukt in €2015 – de bedragen zijn niet verdisconteerd.

⁶⁸ Deze brede range voor CO₂-afvang komt door zeer sterk uiteenlopende inschattingen in de geraadpleegde bronnen. Zie ook Appendix D.



Figuur 35 Investeringsnoden voor de chemie in EUR2015 miljoen.

2. Raffinage



Figuur 36 Overzicht implicaties voor de raffinagesector.

Samenvatting

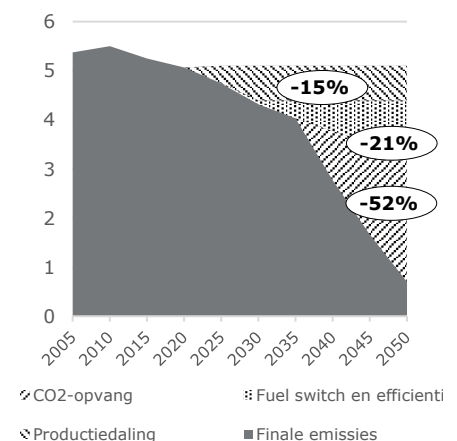
Het centraal verkenningsscenario (**MIX**) voor raffinage schat dat er een reductiepotentieel is van circa 88% van de emissies t.o.v. 2005 van 5,4 Mton CO_{2eq.} broeikasgasemissies naar 0,66 Mton CO_{2eq.} in 2050. Dit komt neer op een daling van 4,7 Mton CO_{2eq.}.

De emissiereducties tussen 2005 en 2050 worden gerealiseerd op drie manieren:

1. Ten gevolge van een dalende vraag naar geraffineerde brandstoffen verwachten we een beperkte reductie in de **productiecapaciteit** van raffinage met 15% tussen nu en 2030.
2. Het potentieel op verdere efficiëntieverbeteringen wordt beperkt ingeschat, met 10% verbetering tussen nu en 2050. Samen met een **'fuel switch'** van fossiele brandstoffen naar syn-brandstoffen en elektrificatie, verantwoordelijk voor 21% reductie van de emissies.
3. Een sterkte nood aan **CO₂-afvang** als belangrijkste mitigatie-instrument om restemissies af te vangen, leidt dit tot een verdere 52% reductie van de emissies. Dit is in lijn met de studie van Concawe⁶⁹.

De Europese raffinaderijen zullen steeds meer onder druk komen te staan door het zuiniger omspringen met fossiele energie en de verschuiving naar klimaatvriendelijke energiedragers (biobrandstoffen, elektriciteit, ...) in andere sectoren. De raffinagesector zal inderdaad moeten innoveren om de koolstofintensiteit van zijn brandstoffen te verlagen, terwijl de transportsector verder zal innoveren inzake elektrificatie en brandstoffen.

Op basis van een studie van het Clingendael International Energy Programme (CIEP)⁷⁰ wordt gesteld dat het merendeel van de raffinagecapaciteit in Vlaanderen een 'must run' status heeft en daardoor de kans groter is dat deze tot 2050 kan voortbestaan in Vlaanderen omdat ze bij de meest performante, best gelegen en goed geïntegreerde raffinaderijen van Europa behoren. Dit houdt in dat de kans bestaat dat de Antwerpse raffinaderijen bij de laatste raffinaderijen van Europa zullen zijn en dit is gebaseerd op de huidige locatie, huidige resultaten vergeleken met andere Europese raffinaderijen en de integratie met de petrochemische sector. De Belgische raffinaderijen zijn hiervoor goed gepositioneerd en verbonden om te voorzien in een groot achterland en de diepzee-exportmarkt. De CIEP studie dateert



Figuur 37 Evolutie broeikasgasemissies (Mton).

⁶⁹ Concawe (2018). Low-carbon pathways CO₂ efficiency in the EU refining system 2030/2050.

⁷⁰ Clingendael (CIEP) (2018). Refinery 2050: Refining the clean molecule.

van na de economische crisis 2008-2010 en heeft de disruptieve impact ervan meegenomen in de must-run analyse. De huidige COVID-gerelateerde crisis én de recente versnelling van de elektrificatie van de wegtransport sector en in mindere mate gebouwenverwarming zullen een nieuwe analyse vergen met betrekking tot verwachte raffinagecapaciteit in Europa en de mogelijke impact voor Vlaanderen.

Er wordt een lichte **reductie in raffinagecapaciteit** voorzien van 15% naar 2030 toe en deze capaciteit wordt na 2030 stabiel aangehouden. Dit verklaart 15% van de totale 88% vermeden emissies in 2050 t.o.v. 2005.

Het centraal verkenningsscenario (**MIX**) schat een **broeikasgasreductie in van 88%** tegen 2050 ten opzichte van 2005. Het belangrijkste mitigatie-instrument om grote reducties te realiseren voor de raffinaderijen in Antwerpen betreft de toepassing van **CO₂-afvang**. Dit is ook gebaseerd op de roadmap van Concawe. Dit verklaart 52% van de broeikasgasvermindering in de raffinagesector.

Daarnaast is er nog een (beperkt) potentieel voor verdere efficiëntieverbeteringen binnen de Vlaamse raffinaderijen (10% verbetering tegen 2050), alsook om het energieverbruik binnen de raffinaderijen verder te vergroenen. Momenteel verbruiken raffinaderijen voornamelijk hun eigen restproducten (raffinagegas en PET-cokes), aangevuld met aardgas als belangrijkste energiebron. Het aardgas (en klein aandeel raffinagegas naast biomassa en andere brandstoffen) wordt voornamelijk ingezet in WKK's om warmte en elektriciteit op te wekken die binnen de raffinaderijen wordt geconsumeerd. Daarboven is er nog een (beperkte) netto-afname van elektriciteit van het net. In ons verkenningsscenario zijn we ervan uitgegaan dat tegen 2050 40% van het aardgasverbruik wordt geëlektrificeerd. Dit impliceert een hogere afname van (koolstofvrije) elektriciteit van het net ter vervanging van eigenproductie in WKK's, in combinatie met een (gedeeltelijke) elektrificatie van de warmteproductie. Van het overige aardgasverbruik wordt tegen 2050 nog eens 25% vervangen door synthetische brandstoffen. Voor wat betreft de raffinagegassen is er potentieel om deze – althans gedeeltelijk – te recupereren als feedstock voor de productie van High Value Chemicals. De verminderde inzet van raffinagegas als energiebron moet in dat geval wel gecompenseerd worden door andere energiedragers (aardgas en/of elektriciteit). Vlaamse raffinaderijen zetten momenteel al in op dit potentieel, wat geleid heeft tot een lager energieverbruik van raffinagegas en een hoger verbruik van aardgas tussen 2015 en 2018. Voor ons verkenningsscenario is de mate van recuperatie van raffinagegas in de toekomst behouden op het niveau van 2018.

Deze **combinatie van verdere efficiëntieverbeteringen, elektrificatie, en de inzet van syn-brandstoffen** verklaart 21% van de vermeden emissies. Een verdere recuperatie van raffinagegassen als feedstock zou – mits deze in de energiemix worden vervangen door klimaatneutrale energiedragers – de emissies nog verder kunnen reduceren.

Deze reducties hebben enkel betrekking op de raffinageproductieprocessen zelf. Vermeden emissies gelinkt aan innovaties in brandstoffen om de emissies te verminderen in de transportsector zijn niet in scope van deze studie.

Momenteel is Vlaanderen een netto-importeur van nafta: het verbruik voor de productie van HVC's ligt ongeveer 2,5 maal hoger dan de productie in de

raffinaderijen. Indien HVC's in de toekomst worden geproduceerd door alternatieve feedstocks (biomassa, ethanol, methanol, kunststof recycling en CCU) zal er zich mogelijk een **overaanbod aan nafta** voordoen in Vlaanderen. Het kantelpunt wordt hier onder ons verkenningsscenario na 2040 verwacht. In dit geval wordt er verwacht dat de raffinaderijen in Vlaanderen dit overaanbod zullen exporteren naar andere regio's in Europa doordat de sluiting van andere raffinaderijen in Europa de exportvraag in Vlaanderen met hun 'must-run' status, zullen doen stijgen.

De totale hoeveelheid energievraag zal onder het verkenningsscenario slechts beperkt dalen van 23,4 TWh in 2015 naar 21,8 TWh in 2050, en dit ondanks een dalende productiecapaciteit (-15%) en verbeterde efficiëntie (10%). Dit is voornamelijk te verklaren doordat CO₂-afvang in de raffinagesector zeer energie-intensief is door de moeilijk te capteren en lage concentratie CO₂-bronnen. We gaan er in ons scenario van uit dat deze energievraag afkomstig is van elektriciteit. Dit leidt tot een bijkomend elektriciteitsverbruik van 3,0 TWh in 2050. Dit heeft naast een sterke impact op het elektriciteitsnet, ook een sterke impact op de OPEX-kosten van de sector aangezien de elektriciteit in Vlaanderen duur is t.o.v. andere energiedragers. Afhankelijk van innovaties, marktprijzen en procesintegratie om restwarmte te recupereren kan voor een andere energiedrager geopteerd worden voor CO₂-afvang.

De realisatie van dit centraal verkenningsscenario is gelinkt aan belangrijke **randvoorwaarden**:

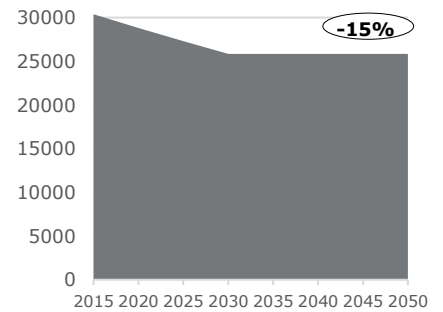
- De keuze en implementatie van CO₂-afvang, elektrificatie en een switch naar syngas zal in grote mate afhangen van de prijzen en beschikbaarheid van de energiedragers op de markt.
- Om significante emissiereducties te kunnen realiseren in de raffinagesector, die in Antwerpen gelokaliseerd is dient de CO₂-afvang infrastructuur in de periode 2020-2030 voorzien te worden.
- De sterke stijging van elektriciteitsafname van het net door raffinaderijen (+ 5,7 TWh), is afkomstig van twee locaties in Antwerpen die dicht bij elkaar liggen in het havengebied. Het transmissienetwerk dient dan ook enorm versterkt te worden in de periode 2020-2030 om in deze behoefte te voorzien. (N.B. naast een stijging van +5,7 TWh in raffinaderijen voorziet het centraal verkenningsscenario (**MIX**) een nog hogere stijging in de chemiesector met + 11,8 TWh, die eveneens grotendeels in het Antwerps havengebied gelegen is).

De klimaat- en energietransitie zal echter een grote druk zetten op de raffinagesector door een wereldwijde dalende marktvraag, o.a. door de elektrificatietrend in de transportsector. Indien deze raffinagesector competitief wil blijven en zijn status van 'must-run' wil bestendigen, dienen er aan heel wat randvoorwaarden voldaan te worden. Een groot deel van deze randvoorwaarden zijn gelinkt aan semipublieke infrastructuurprojecten, waarbij projecten zoals Antwerp@C als een belangrijke faciliterende factor worden gezien. Indien Vlaanderen er niet in slaagt om dit project (tijdig) te realiseren, dan komt de positie van de Vlaamse raffinagesector potentieel onder druk te staan.

Productievolumes

De Europese raffinaderijen staan op twee manieren onder druk. Enerzijds worden ze geconfronteerd met een afnemende marktvraag doordat hun belangrijkste afnemers, met name de transportsector, in grote mate zullen overschakelen op alternatieve klimaatneutrale energiedragers zoals elektrificatie, syn-brandstoffen en biobrandstoffen. Anderzijds is er de toenemende druk van o.a. de EU om zuiniger om te springen met fossiele energie en om fossiele koolstof niet meer te emitteren in de atmosfeer. Er is de algemene verwachting dat op Europees niveau een significante afname in raffinagecapaciteit zal plaatsvinden, daar de vraag naar olie in Europa zal dalen met 32% tegen 2040.

In het centraal verkenningsscenario wordt een **reductie** in **raffinagecapaciteit** voorzien van 15% naar 2030 toe en deze capaciteit wordt na 2030 stabiel aangehouden. Dit houdt in dat de raffinageproductie daalt van 30.383 kton in 2015 naar 25.826 kton in 2050.

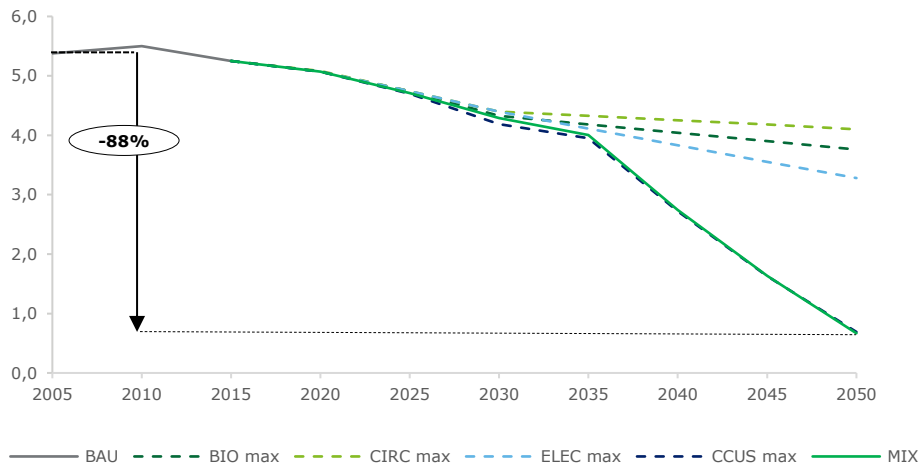


Figuur 38 Evolutie raffinageproducties (kton).

Evolutie van emissies

Het potentieel is aanwezig om circa 89% van de emissies t.o.v. 2005 te reduceren van 5,4 Mton broeikasgasemissies naar 0,66 Mton in 2050, bij een beperkt dalend productievolume.

De resultaten van het referentiescenario, de vier thematische maximaal haalbare transitiepaden, en het centraal verkenningsscenario worden weergegeven in Figuur 39.



Figuur 39 Broeikasgasreducties in de raffinage (Mton).

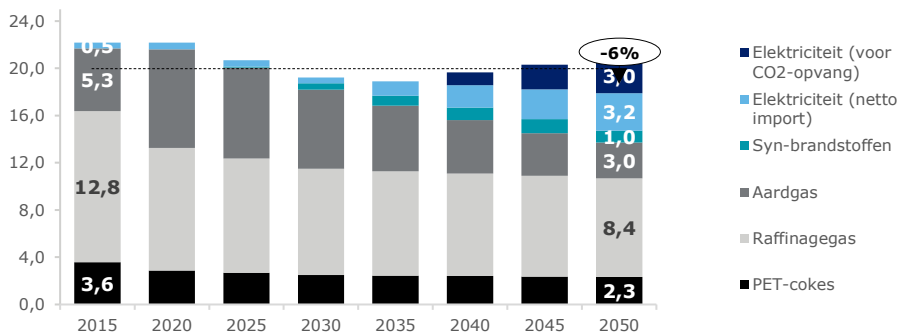
De belangrijkste manier om de broeikasgasemissies significant te reduceren in de raffinagesector is via het gebruik van CO₂-afvang in combinatie met een veranderende energiemix.

In dit centraal verkenningsscenario worden de eerste reducties, t.e.m. 2035 gecreëerd door een afnemende productie in combinatie met efficiëntiewinsten en een gedeeltelijke overschakeling van aardgas naar elektrificatie en syn-brandstoffen. Vanaf 2035 wordt het potentieel van CO₂-afvang toegepast. Dit potentieel neemt verder toe t.e.m. 2050.

Dit toont aan dat de realisatie van carbon capture faciliteiten een sleutelpositie inneemt in het doorvoeren van de transitie voor de raffinagesector.

Evolutie van energievraag en feedstock

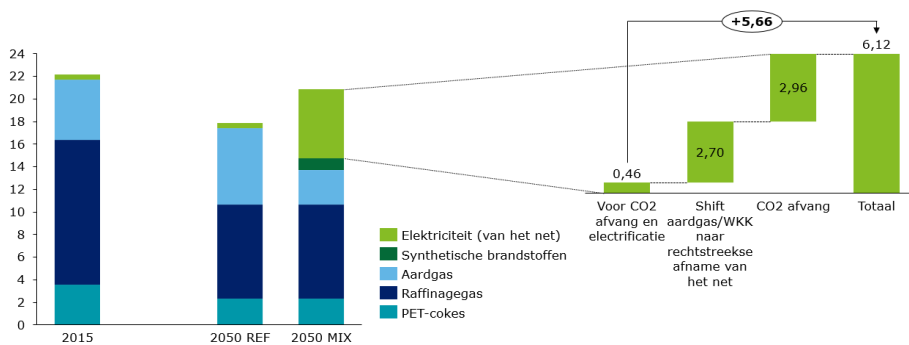
De totale hoeveelheid energievraag zal onder het verkenningsscenario slechts beperkt dalen (-6%), van 22,2 TWh in 2015 naar 20,9 TWh in 2050, en dit ondanks een dalende productiecapaciteit (-15%) en verbeterde efficiëntie (10%). Deze beperkte daling is voornamelijk te verklaren doordat CO₂-afvang energie-intensief is door de moeilijk te capteren en lage concentratie CO₂-bronnen. De veronderstelling is dat in het verkenningsscenario deze energievraag afkomstig is van elektriciteit. Dit leidt tot een bijkomende elektriciteitsconsumptie van 3TWh in 2050. Een verdere vervanging van aardgas door rechtstreeks elektriciteitsverbruik leidt tot een verdere stijging van de elektriciteitsvraag van het net.



Figuur 40 Evolutie energieverbruik raffinaderijen in het centraal verkenningsscenario (MIX) (in TWh) (excl. afgefakkelde restgassen).

In het verkenningsscenario leidt dit tot volgende observaties:

- De elektriciteitsafname van het net stijgt exponentieel, van 0,5 TWh in 2015 tot 6,2 TWh in 2050, en dit onder meer door CO₂-afvang. Het potentieel dient verder onderzocht te worden om deze hoge energievraag terug te dringen. Er is o.a. een mogelijkheid om restwarmte efficiënter in te zetten om aan deze energiebehoefte te voldoen. Dit is verder uitgewerkt in leverbaarheid 2.
- Deze stijgende elektriciteitsvraag zal gepaard moeten gaan met een versterking van de infrastructuur.
- De energievraag stijgt bij een dalend productievolume. Dit zal invloed hebben op de OPEX-kosten per geproduceerde eenheid.
- 0,7 TWh en 10% van de totale energiebehoefte kan voldaan worden door een fuel switch naar syn-brandstoffen.
- Ook in 2050 wordt nog deels PET-cokes verbruikt. Er wordt ervan uit gegaan dat dit een onvermijdelijke reststroom is van het raffinageproces.



Figuur 41 Nood aan elektriciteit in de raffinage (in TWh) (excl. afgefakelde restgassen).

In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) wordt naast CO₂-afvang ook ingezet op een fuel switch om 25% van het resterende aardgasverbruik (na overgang tot gebruik van elektrificatie en biomethaan) dat gebruikt wordt voor energiedoelinden door syn-brandstoffen te vervangen.

De verwachting is dat 50% van die syn-brandstoffen in 2050 nog koolstof bevatten (d.w.z. methaan (gasvormig) en methanol (vloeibare vorm)). De CO₂ die wordt gebruikt als feedstock voor deze syn-brandstoffen wordt aangeleverd door de afvang van CO₂ uit andere sectoren. De emissies die vrijkomen met de verbranding van deze brandstoffen worden opnieuw aangerekend in het model, tenzij zij op hun beurt ook worden afgevangen. De overige 50% van de syn-brandstoffen zullen gebaseerd zijn op koolstofvrije alternatieven zoals H₂ (gasvormig) en ammoniak (vloeibare vorm). Deze alternatieven kunnen deels ingemengd worden in het bestaande aardgasnet of kunnen toegeleverd worden via een nieuw aan te leggen H₂-netwerk in de Antwerpse haven.

Verder dient er omtrent syn-brandstoffen opgemerkt te worden dat het gebruikte model de overschakeling op syn-brandstoffen op dezelfde manier toepast voor alle industriële sectoren. In de toekomst kan het echter efficiënter zijn om deze brandstoffen voor te behouden voor die sectoren die weinig alternatieve reductiemogelijkheden hebben zowel binnen de industrie (bijv. kleinere, diffusere sectoren die hoge temperaturen nodig hebben en weinig potentieel voor CO₂-afvang hebben) als daarbuiten (bijv. transport). De inzet van synthetische brandstoffen in andere industriële sectoren die ook alternatieve reductiemogelijkheden hebben waaronder CO₂-afvang (bijvoorbeeld staal, raffinage en de grote chemische clusters) is mogelijk niet het meest efficiënt gebruik van die brandstoffen. Aangezien het model geen onderscheid tussen verschillende sectoren mogelijk maakt, is uitgegaan van een relatief bescheiden omschakeling naar syn-brandstoffen (25% van al het aardgas dat wordt gebruikt voor energiedoelinden) over alle sectoren heen.

Evolutie technologie-aandeel

In de raffinagesector is volledige vervanging van de huidige productietechnologie moeilijk omwille van de grote complexiteit. Nieuwe technologieën zullen geïntegreerd moeten worden binnen de bestaande processen. Dit omvat onder andere elektrificatie van processen, productie van H₂ zonder CO₂-emissies, terugwinning van HVC's in het raffinagegas en aanpassen van installaties voor efficiënte opvang van CO₂-emissies. Voorts kan de raffinagesector een belangrijke rol spelen in toekomstige productie

van syn-brandstoffen (met gedeeltelijk gebruik van bestaande processen of proces-kennis).

Routes en technologische innovaties

De **huidige toepassingen** van technologieën in de raffinagesector zijn als volgt:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Raffinage	Referentie	Distillatie en andere processen	9	-

Tabel 4 Huidige technologieën gesimuleerd voor de Vlaamse raffinagesector.

Volgende technologieën zijn verder **gesimuleerd** in het centraal verkenningsscenario, in combinatie met huidige technologieën:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Raffinage	Fuel switch	Syn-brandstoffen toevoegen aan raffinageproces	5-7	2035
CO₂-afvang	CCUS	Carbon Capture and Storage	6-8	2035

Tabel 5 Verwachte TRL-niveaus van technologieën in de raffinagesector.

Volgende technologie is niet opgenomen in het verkenningsscenario, wegens de beperkte mogelijkheden op industrialisatie t.o.v. 2050:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Raffinage	Elektrificatie	Elektrificatie warmte (lage/middelhoge T)	5-7	2040

Tabel 6 Buiten beschouwing gelaten technologie in het centraal verkenningsscenario (MIX).

Dit is echter afhankelijk van het voldoen aan (economische) randvoorwaarden, die in detail zijn beschreven bij de inleiding van dit hoofdstuk.

Er zijn volgende opportuniteiten geïdentificeerd voor **verdere innovatie en opschaling van technologieën** binnen Vlaanderen en Europa:

- **CO₂-afvang**: streven naar hogere efficiëntie door het energieverbruik te verminderen en via procesintegratie restwarmte te recupereren uit bestaande processen.
- **Elektrificatie van bestaande processen**: de behaalde efficiëntie winsten kunnen dan de hogere verwachte energieprijzen compenseren.

CAPEX

De transitie zal leiden tot hoge investeringsnoden voor zowel de overheid als private ondernemingen in de raffinagesector. Het totale kostenplaatje kan in het kader van deze studie niet worden ingeschat, enerzijds door een gebrek aan data, maar tevens omdat de scope van deze opdracht maar een beperkt deel van de transitie afdekt.

De verschillende componenten van investeringsnoden zijn als volgt:

- Investeringsnoden in de energieproductie en het energiesysteem (buiten de scope van onze opdracht - niet berekend, maar de verwachting is

wel dat dit aanzienlijk zal zijn).⁷¹ Dit is wel onrechtstreeks opgenomen in de OPEX inschattingen via de elektriciteitsprijs (die stijgt omwille van de assumptie dat de investeringen in het elektriciteitssysteem integraal worden doorgerekend).

- Uitrol van nieuwe productietechnologieën (inschatting gemaakt).
- Kosten voor CO₂ afvang (inschatting gemaakt).
- Investerings om het huidige productiepark op peil te houden tot en met 2050 (onderhoud en renovatie/vervanging van huidige productiepark)⁷² (niet berekend wegens gebrek aan data).
- Investerings voor (publieke) infrastructuur, waaronder transportnetwerken voor H₂ en CO₂-transport, opslag van CO₂ en importnetwerken (niet berekend daar dit sterk afhankelijk is van de dimensionering van deze infrastructuur en zeer tracé-afhankelijk).

Voor wat het aandeel van vereiste investeringen (CAPEX) voor de implementatie van de gekozen klimaatneutrale technologieën betreft, worden deze ingeschat tussen de €1,5 en 2,4 miljard tussen nu en 2050, waarvan rond de €1,1 miljard in de toepassing van nieuwe productietechnologieën (productie van syn- en biobrandstoffen) en €436 miljoen tot 1,3 miljard voor CO₂-afvang in de raffinagesector (excl. transport en opslag)⁷³.

De investeringen (CAPEX) voor de productiecapaciteit voor synthetische brandstoffen worden ingeschat op €760 miljoen. Het betreft enkel de productiecapaciteit die nodig is om tegemoet te komen aan de vraag vanuit de industrie (dus niet voor bijv. de transportsector), rekening houdend met een importaandeel van 25%.

De investeringen (CAPEX) voor de productiecapaciteit voor biobrandstoffen worden ingeschat op €350 miljoen. Het betreft enkel de productiecapaciteit die nodig is om tegemoet te komen aan de vraag vanuit de industrie (dus niet voor bijv. de transportsector), rekening houdend met een importaandeel van 25%. De productie van bio-ethanol en bio-methanol als feedstock voor de chemie (HVC-productie) zijn hier ook niet in meegenomen, maar worden mee in rekening gebracht bij de chemiesector.

De investeringen (CAPEX) voor de toepassing van CO₂-afvang in de raffinagesector worden ingeschat tussen €436 miljoen en 1,3 miljard⁷⁴. Deze investeringen houden enkel rekening met de afvang van CO₂, en houden geen rekening met investeringen voor infrastructuur om de CO₂ te transporteren en eventueel geologisch op te slaan.

Sectorkoppeling

Er is een potentiële sectorkoppeling tussen chemie en raffinage, waarin de recuperatie en valorisatie van restgassen indirect de raffinagesector zullen impacteren. Dit heeft voornamelijk te maken met het uitfaseren van nafta in de productie van HVC's (zie beschrijving 'Chemie') en de substitutie door andere basisproducten zoals ethanol en methanol. Het centraal

⁷¹ De VNCI 'Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050' van Ecofys en Berenschot (2018) schat in dat van € 63 miljard voor de transitie van de Nederlandse chemische industrie, meer dan de helft (€ 37 miljard) in de energiesector zit.

⁷² omdat er onvoldoende info beschikbaar is over de vereiste investeringen hiervoor

⁷³ Deze brede range voor CO₂-afvang komt door zeer sterk uiteenlopende inschattingen in de geraadpleegde wetenschappelijke bronnen. Zie ook Appendix D.

⁷⁴ Deze brede range voor CO₂-afvang komt door zeer sterk uiteenlopende inschattingen in de geraadpleegde bronnen. Zie ook Appendix D.

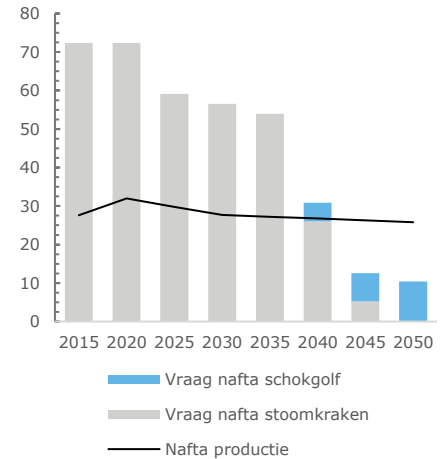
verkenningsscenario gaat uit van de assumptie dat dit vanaf 2035 zal plaatsvinden, doordat de technologie dan marktrijp zal zijn om CO₂ te valoriseren in de chemische waardeketens via CCU. Echter andere transitiepaden blijven ook mogelijk zoals beschreven in de andere verkennende scenario's (varianten) waar de koppeling tussen chemie en raffinage zal blijven bestaan.

Momenteel is er een tekort aan nafta in Vlaanderen, wat een vraag en daaraan gelinkt een import creëert. Door de verwachte verandering in de waardeketens in de chemische sector, zal er mogelijk een overschot aan naftaproductie ontstaan in Vlaanderen. De inschatting in het verkenningsscenario is dat dit kantelpunt zich in 2045 zal bevinden.

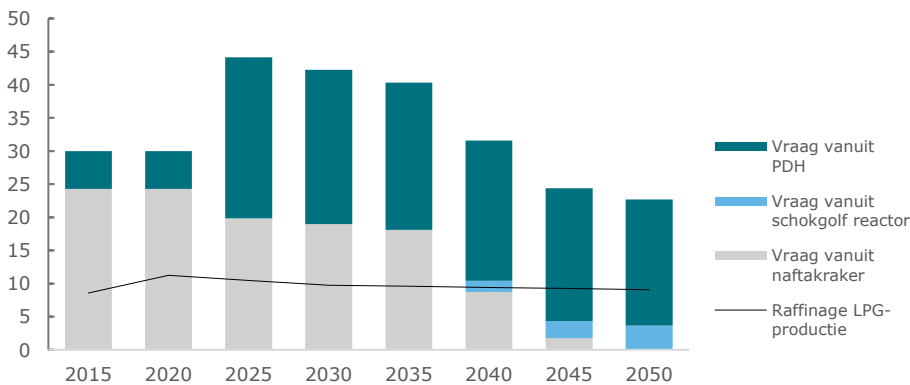
Deze verandering zal ervoor zorgen dat de Vlaamse raffinaderijen nafta zullen exporteren naar de rest van Europa omdat zij bij de laatste raffinaderijen van Europa zullen behoren. De Vlaamse raffinaderijen exporteren reeds vele van hun eindproducten, gefaciliteerd door de goede locatie in de haven van Antwerpen. De export van nafta kan een opportuniteit betekenen om meer omzet te bekomen per hoeveelheid product.

Daarnaast heeft de chemie ook vraag naar LPG die door de raffinage wordt geproduceerd. De totale vraag naar LPG zal blijvend groter zijn dan het aanbod. Dit komt voornamelijk door de nieuwe propaan dehydrogenatie (PDH) installaties die worden opgezet door Ineos en Borealis. Gezien deze installaties pas in de komende jaren gebouwd zullen worden, gaat het model ervan uit dat deze ook in 2050 nog operationeel zijn. Wegens die installaties zal er ook in de toekomst LPG-import moeten plaatsvinden in Vlaanderen om aan de totale vraag te voldoen.

De substitutie van nafta met ethanol en methanol is één van de mogelijke toekomstscenario's maar nog geen vaststaand pad. Afhankelijk van o.a. de evolutie van de energieprijzen en het eventueel goedkoper worden van fossiele brandstoffen t.o.v. elektriciteit, bestaat de mogelijkheid dat er nog steeds een naftavraag vanuit de chemie zal zijn in Vlaanderen. Dit is ook zo gesimuleerd in Var2. Toekomstige economische en beleidsontwikkelingen en beslissingen vanuit de industrie zullen finaal bepalend zijn welk pad zich zal realiseren.

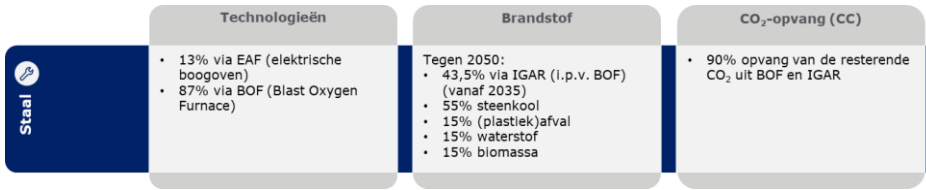


Figuur 42 Nafta vraag en aanbod en productiewijze in het voorgestelde verkenningsscenario (TWh).



Figuur 43 LPG/propaan vraag en aanbod (in TWh).

Staal



Figuur 44 Overzicht implicaties voor de staalsector.

Samenvatting

Het centraal verkenningsscenario voor staal gaat uit van de inzet van verschillende routes om significante CO₂-reducties te kunnen realiseren. Het potentieel is aanwezig om, ondanks een licht stijgend productievolume van 9%, de emissies met circa 92% t.o.v. 2005 te doen reduceren. Daarmee is er een daling van 9,7 Mton broeikasgasemissies in 2005 naar 0,7 Mton in 2050. Dit komt neer op een daling van 9 Mton.

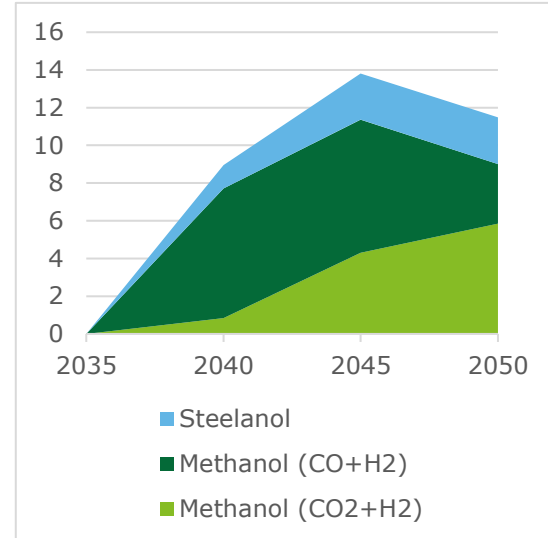
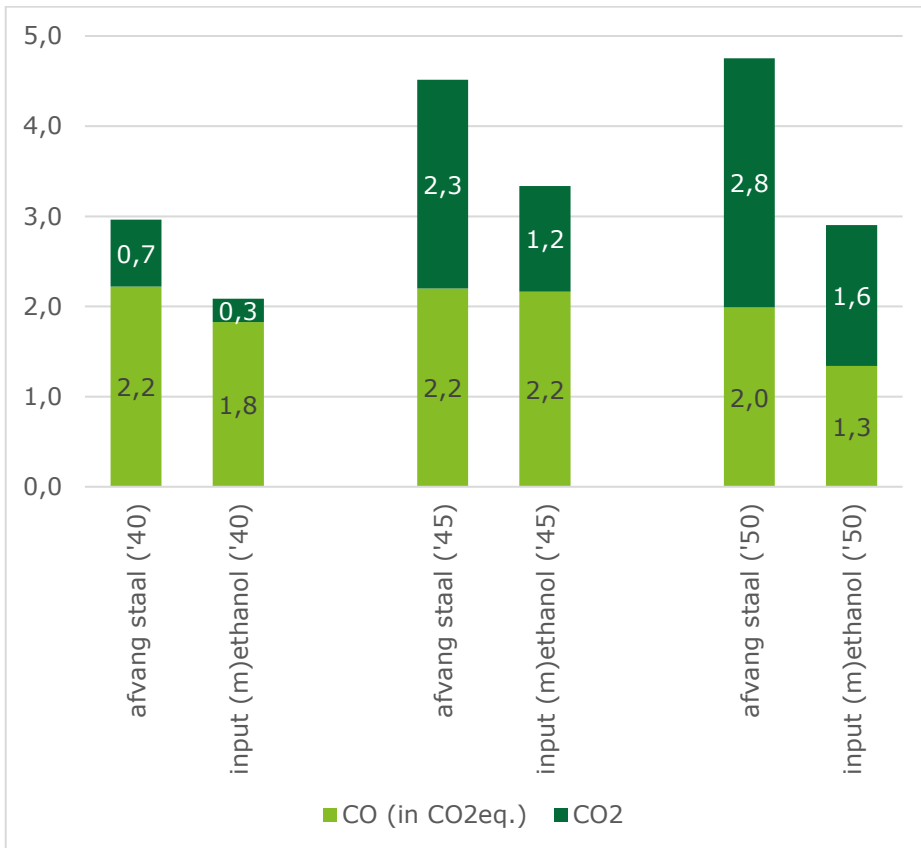
Er is geopteerd om, in lijn met de plannen van ArcelorMittal, in te zetten op het behoud van de BF-BOF-technologie om staal te produceren. Daardoor kunnen emissiereducties worden gerealiseerd op twee manieren. Enerzijds is er een potentieel voor **gedeeltelijke omschakeling** van steenkool naar alternatieve inputs in de hoogovens:

- Inzet van kunststofafval en CO₂ die via plasma gassificatie (via IGAR-technologie) kan worden omgezet in H₂ en CO dat in de hoogovens kan worden ingezet als alternatief voor steenkool (**circulair**).
- Inzet van houtafval, of ander biobased restafval, dat na torrefactie (i.e. houtafval verwerken tot biokoolstof) in de hoogovens kan worden ingezet als alternatief voor steenkool (**biomassa**).
- Bijkomende injectie van H₂ in de hoogovens ter gedeeltelijke vervanging van steenkool (**elektrificatie en H₂**).

Hiermee kunnen 3 Mton broeikasgasemissies worden vermeden. De alternatieve H₂-DRI-route, waarbij de staalproductie grotendeels gebaseerd is op H₂, is niet gesimuleerd in het centraal verkenningsscenario. Deze optie is op dit moment niet ingeschreven in de roadmap van het geïntegreerd staalbedrijf, ArcelorMittal, in Vlaanderen. Vooral omdat op dit moment de kosten voor H₂ nog zeer hoog zijn en de nodige H₂-netwerken nog niet aanwezig zijn en anderzijds vanwege de zeer hoge investerings- en exploitatiekosten om BOF-routes volledig om te bouwen in een bestaand en sterk geïntegreerd staalbedrijf. Echter, de BF-BOF route is ook compatibel met het gebruik maken van H₂ en indien H₂ goedkoper wordt en de nodige H₂-netwerken worden gerealiseerd, kan er beslist worden om meer H₂ in de hoogovens in te zetten of zelfs om te schakelen naar H₂-DRI-processen. *De keuze om staal te blijven produceren via BF-BOF houdt echter wel een potentieel risico in als de H₂-productie zeer goedkoop wordt na 2035 door bijvoorbeeld innovaties in elektrolyzers en beschikbaarheid van voldoende hernieuwbare energie.*

Van de overblijvende emissies kan er anderzijds nog 4,8 Mton CO₂ gecapteerd worden via **CO₂-afvang**. Er is een sterk potentieel om deze CO en CO₂ verder te valoriseren via de koppeling met een chemische waardeketen. De gecapteerde CO₂ kan worden gebruikt om methanol te produceren en de gecapteerde CO kan worden ingezet om ofwel methanol (via syngas route) ofwel ethanol (via Steelanol route) te produceren. Beide

producten zijn basisproducten voor de productie van HVC's en zijn nieuwe platformmoleculen die in Vlaanderen mogelijk een sterk potentieel kennen. Hierdoor wordt de koolstof van staal nuttig gevaloriseerd en emissies vermeden bij de inzet van nafta uit de raffinagesector.



Figuur 45 Mogelijke productie van ethanol en methanol uit hoogovengas, met links een overzicht van het hergebruik van CO en CO₂ onder het centraal verkenningsscenario (in Mton CO₂eq.) en rechts de productieniveaus van Steelanol en methanol uit CO en CO₂ (in TWh)

De totale hoeveelheid energie- en feedstockvraag is voor de staalsector quasi onveranderd gebleven in 2050 t.o.v. 2015. De voorwaardelijke mix zal er echter wel sterk anders uitzien door de verschuiving van 40% steenkool naar H₂, kunststofafval en biomassa. Via verdere efficiëntieverbeteringen zal in totaal 54% minder steenkool worden verbruikt in 2050. Een neveneffect van dergelijke maatregelen, als ook de CO₂-afvang, is dat er meer dan een verdubbeling van het elektriciteitsverbruik wordt verwacht om de energiebehoefte in te vullen.

De productie van secundair staal is al in grote mate geëlektrificeerd en draagt dus maar in beperkte mate bij aan de broeikasgasemissies van de staalindustrie. Naar 2050 worden slechts beperkte wijzigingen verwacht t.o.v. de huidige situatie, waaronder een beperkte vervanging van aardgas door synthetische brandstoffen (25%).

De realisatie van dit centraal verkenningsscenario is wel gelinkt aan belangrijke **randvoorwaarden**:

- De infrastructuur moet worden voorzien om H₂ te bevoorraden aan het staalbedrijf en het staalbedrijf dient verbonden te worden met chemische bedrijven om de hoogovengassen te kunnen valoriseren

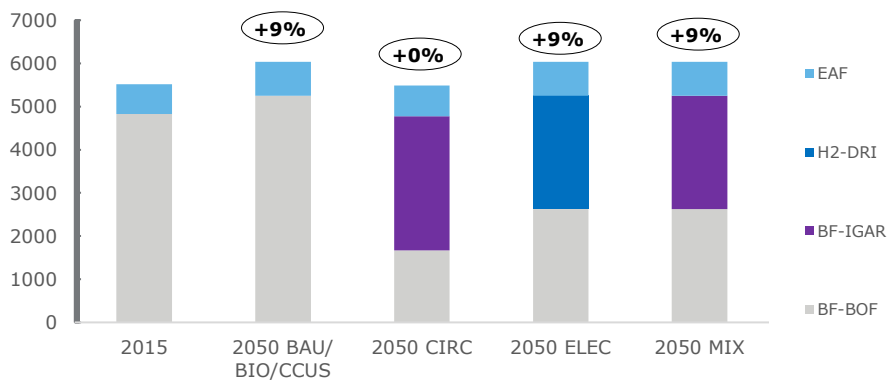
via ethanol/methanol productie. Er is een potentieel om deze verbinding te maken via pijpleidingen met chemische bedrijven in Terneuzen, Nederland, op het grondgebied van North Sea Port. Alternatief zou er een verbinding met de chemische cluster in Antwerpen kunnen voorzien worden.

- De logistieke ketens dienen op punt gezet te worden om kunststofafval en biomassa in te zamelen, te importeren en te bevoorraden aan de staalsector.
- De kostprijs en beschikbaarheid van duurzame brandstoffen zoals H₂, biomassa en kunststofafval zullen leidend zijn voor de omschakeling van steenkool naar deze alternatieve energiedragers.

Door het inzetten op alternatieve feedstocks zoals kunststofafval en biomassa moet er een nieuwe logistieke waardeketen ontstaan in Vlaanderen om dit onder meer in te zamelen en te transporteren naar de industrie.

Er is geopteerd om de simulaties in de verkenningsscenario's (grotendeels) te enten op de toekomstplannen van ArcelorMittal en hun roadmap en is ook doorgesproken met hun experts en de sectorfederatie. Binnen ArcelorMittal evalueren ze de roadmap steeds in functie van technologische en economische ontwikkelingen. Momenteel voeren ze piloot- en demoprojecten i.k.v. de klimaattransitie en bereiden ze de omslag voor door te investeren in 'must haves' waar ze zich in elk mogelijk toekomstscenario op kunnen beroepen zonder nu reeds een technologische lock-in te creëren.

Productievolumes



Figuur 46 Staal productieniveaus in de verschillende scenario's (kton) ⁷⁵.

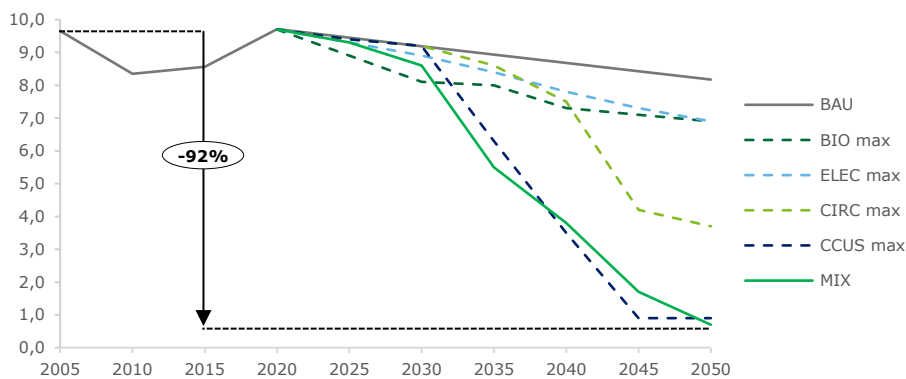
In het referentiescenario en de thematische transitiepaden wordt een productievolume voorzien van 6,0 Mton tegen 2050. Dit is een stijging van 9% ten opzichte van 2015. Deze stijging is reeds gerealiseerd tussen 2015 en 2018 door een capaciteitsuitbreiding (debottlenecking) van de sector. De productie voor primair staal wordt geacht gelijk te blijven op het niveau van 2019. De vraag naar staal stijgt in het algemeen, maar er wordt de assumptie genomen dat door het toepassen van het principe van circulariteit de stijging wordt ingenomen door de markt aan secundair staal, waarvan de productie in Vlaanderen slechts beperkt is. Enkel in het **CIRC max** scenario wordt een stabiel productievolume voorzien van 5,5 Mton gezien de vraag naar staal in

⁷⁵ De BF-IGAR-technologie wordt in het model gebruikt om de gedeeltelijke vervanging van steenkool door plasticafval en CO₂ in de hoogovens te modelleren. Een 50/50 ratio tussen de BF+IGAR-BOF en BF-BOF-technologie impliceert dat ongeveer 14,5% van de steenkool wordt vervangen door plastic afval + CO₂ input.

dit thematisch pad lager is door een hogere graad van hergebruik en levensduur van producten.

Evolutie van emissies

Het potentieel is aanwezig om circa 92% van de emissies t.o.v. 2005 te reduceren van 9,7 Mton broeikasgasemissies naar 0,7 Mton in 2050 en dit bij een licht stijgend productievolume. Dit komt neer op een daling van 9,0 Mton. De emissies van Centrale Knippegroen die op de site van ArcelorMittal staat en de restgassen van de hoogovens verbrandt, maar eigendom is van Engie Electrabel, zijn bij de huidige emissies van de staalsector gerekend in het model⁷⁶.



Figuur 47 Broeikasgasreducties in de staal (Mton).

Er worden reeds eerder lichte emissiereducties verwacht in de periode 2020-2030 door o.a. efficiëntiewinsten. De significante emissiereducties worden verwacht vanaf 2030 wanneer er een industriële implementatie kan plaatsvinden van een overschakeling op andere inputs (via IGAR en Torrero technologie), in combinatie met CO₂-afvang. Dit potentieel zal verder geoptimaliseerd worden tegen 2050.

De resultaten van het referentiescenario, de vier thematische transitiepaden en het centraal verkenningsscenario worden in Figuur 47 weergegeven.

Hierbij wordt rekening gehouden met het feit dat op het moment van de studie één van de twee hoogoveninstallaties in Gent aangepast zal worden zodat deze in staat zal zijn om de door de Torero installatie geproduceerde bio-steenkool, de H₂ en CO van het IGAR-proces en bijkomende H₂ elders in de hoogoven te gebruiken.

Hoewel elk transitiepad potentieel heeft om reducties te verwezenlijken, zijn er hoofdzakelijk maar twee mogelijke, maar verschillende routes om significante CO₂-reducties te verkrijgen die in lijn liggen met klimaatneutraliteit:

1. Volledig vervangen van de BOF-hoogovens door een H₂-DRI-technologie.
2. Het behouden van de BOF-hoogoven, met omschakeling naar nieuwe technologieën om alternatieve brandstoffen in te zetten, in combinatie met het toepassen van CO₂-afvang.

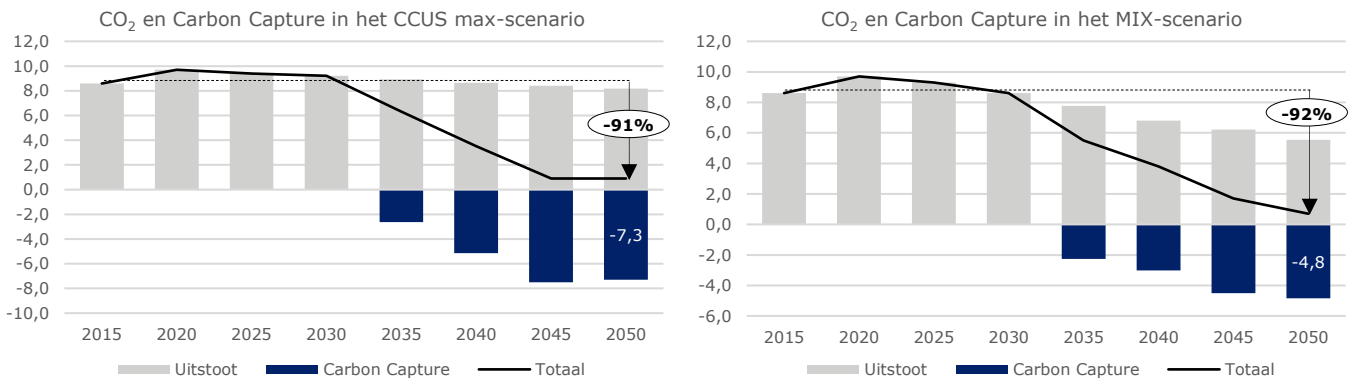
⁷⁶ Er moet ook rekening gehouden worden met dat de restgassen niet meer naar Centrale Knippegroen gaan na de transitie en bijgevolg het verlies in elektriciteit opgevangen moet worden.

De **eerste optie** is voor één van de twee hoogovens in Vlaanderen doorgerekend in het maximaal elektrificatie scenario (**ELEC max**). Emissies zouden dan verminderen met 57%. Deze optie past voorlopig niet binnen het investeringsplan en de roadmap van ArcelorMittal voor Vlaanderen, die als basis heeft gediend voor het centraal verkenningsscenario (**MIX**) en is daarom niet verder gesimuleerd. Enerzijds omdat op dit moment de kosten voor H₂ nog zeer hoog zijn en de nodige infrastructuur nog niet aanwezig is, en anderzijds vanwege de zeer hoge investerings- en exploitatiekosten om BOF-routes volledig om te bouwen in een sterk geïntegreerd en bestaand staalbedrijf. Dit zou een radicale verandering betekenen van alle operaties. Echter, de BF-BOF route is ook compatibel met H₂ en indien H₂ goedkoper wordt en de nodige H₂-netwerken worden gerealiseerd, kan er beslist worden om meer H₂ in de hoogovens in te zetten of zelfs om te schakelen naar H₂-DRI-processen.

De **tweede optie** voor de staalsector is het toepassen van CO₂-afvang in combinatie met het behouden van de BOF-hoogoven. Deze optie kan op twee manieren gerealiseerd worden:

- 2a. Geen vervanging van steenkool in de hoogovens, en enkel toepassing van CO₂-afvang (**CCUS max**).
- 2b. Gedeeltelijke omschakeling van steenkool op biomassa, kunststofafval en H₂ in combinatie met CO₂-afvang (**MIX**).

In beide gevallen is er een potentieel tot het realiseren van significante emissiereducties (>92%, maar met een verschil in de mate van toepassing van CO₂-afvang, zie ook Figuur 48).



Figuur 48 CO₂-afvang in het 'CCUS max' scenario (links) en het centraal verkenningsscenario (MIX) (rechts) (Mton).

In het maximaal Carbon Capture scenario (**CCUS max**) start de uitrol van CO₂-afvang in 2030 en zal 90% van de CO₂-emissies opgevangen worden tegen 2045, opgeslagen worden en waar mogelijk aangewend worden binnen andere sectoren zoals o.a. nabijgelegen chemische bedrijven. In het **CCUS max**-scenario kan potentieel 7,3 Mton CO₂ opgevangen worden van de 8,2 Mton die vrijkomt bij de staalproductie.

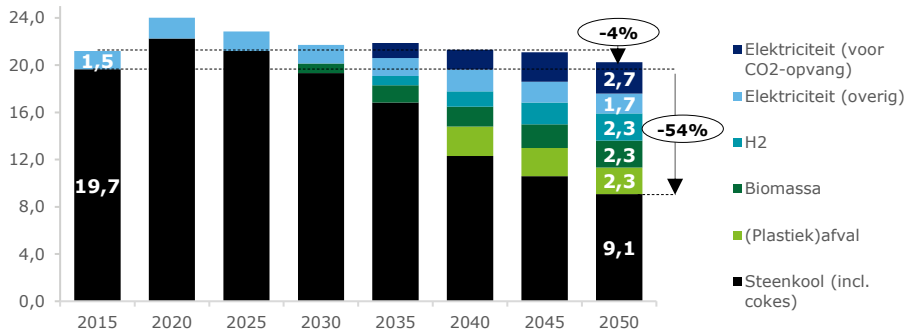
In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) is de afhankelijkheid van CO₂-afvang beperkter, door de inzet van inputs in de hoogovens. Hierdoor kan er potentieel 4,8 Mton CO_{2eq.} opgevangen worden van de 5 Mton CO_{2eq.} die vrijkomt. Het centraal verkenningsscenario omvat drie elementen die helpen om uiteindelijk de CO₂-emissies van deze sector te verminderen met -93% tegen 2050:

1. Verdere efficiëntieverbeteringen.

2. Gedeeltelijke vervanging van steenkool door alternatieve inputs.
3. De toepassing van CO₂-afvang in deze sector.

Evolutie van energievraag en feedstock

De totale hoeveelheid energie- en feedstockvraag zou voor primaire staalproductie quasi onveranderd blijven in 2050 t.o.v. 2015 met een lichte daling van 4%. De voorwaardelijke mix zal er echter wel sterk anders uitzien door de verschuiving van 45% steenkool naar H₂, kunststofafval en biomassa. Daarnaast wordt er ook bijna een verdrievoudiging van het elektriciteitsverbruik verwacht, voornamelijk om de energiebehoefte in te vullen van CO₂-afvang.

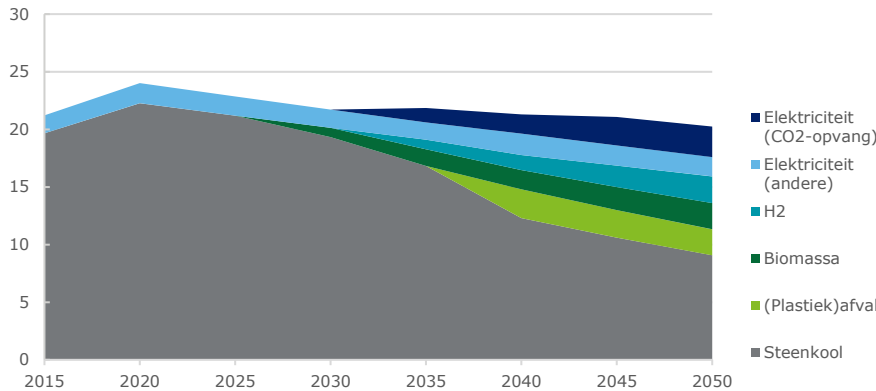


Figuur 49 Evolutie energie-inputs voor primair staal in het centraal verkenningsscenario (MIX) (in TWh).

In het verkenningsscenario leidt dit tot volgende observaties:

- De combinatie van 'fuel switches' en efficiëntiewinsten kan de totale vraag naar steenkool doen dalen met 54% in 2050 t.o.v. 2015 door een lagere energievraag en de gedeeltelijke vervanging van steenkool met circa 15% (kunststof)afval, 15% H₂ en 15% biomassa.
- Er is meer dan een verdubbeling van het elektriciteitsgebruik van 1,5 TWh in 2015 naar 4,3 TWh in 2050 door de energie die nodig is voor CO₂-afvang.
- In vergelijking met Europese scenario's⁷⁷ is er nog een sterke afhankelijkheid van steenkool in 2050 voor de staalindustrie benodigd voor de temperatuur intensiteit van hoogovens.
- In het centraal verkenningsscenario voor de Vlaamse staalsector ligt er een grotere nadruk op het gebruik van kunststofafval in vergelijking met de opgestelde Europese scenario's omdat Vlaanderen door zijn locatie en netwerk geschikt is om dit efficiënt in te zamelen.

⁷⁷ Europese Commissie (2018). A Clean Planet for all: A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>



Figuur 50 Energieverbruik en feedstocks onder het centraal verkenningsscenario (MIX) (TWh).

Evolutie technologie-aandeel

In de Vlaamse staalsector gebeurt momenteel het overgrote deel (87%) van de staalproductie via standaard hoogovens met zuurstof (BOF – Blast Oxygen Furnace). Het resterende deel van de staalproductie (13%) gebeurt via de elektrische vlamboogoven (EAF - Electric Arch Furnace).

Deze aandelen blijven in ons verkenningsscenario ongewijzigd naar 2050 toe. Vanaf 2035 wordt in het centraal verkenningsscenario de IGAR-technologie geïntroduceerd welke impliceert dat de steenkoolinput in de hoogovens gedeeltelijk wordt vervangen door kunststofafval en CO₂ via gassificatie.

Routes en technologische innovaties

De **huidige toepassingen** van technologieën in de staalsector zijn als volgt:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Staal	Referentie	BF-BOF	9	-
Staal	Referentie	EAF	9	-

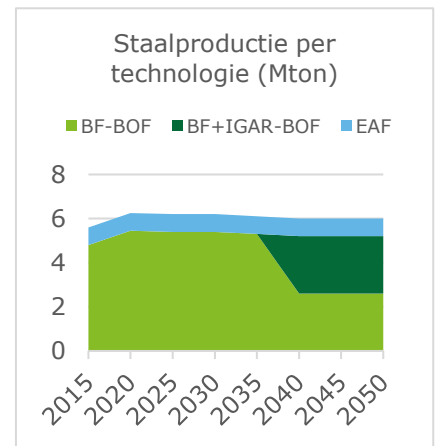
Tabel 7 Huidige technologieën gesimuleerd voor de Vlaamse staalsector.

Volgende technologieën zijn verder **gesimuleerd** in het centraal verkenningsscenario, in combinatie met huidige technologieën:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Staal	Elektrificatie en H ₂	H ₂ -feed in hoogovens	5-8	2030
Staal	Biomassa	Torrefactie van biomassa als feed in hoogovens	5-8	2030
Staal	Circulair/Biomassa/Elektrificatie en H ₂	IGAR (voor inzet van o.a. H ₂ en plasticafval)	5-8	2030
CO ₂ -afvang	CCUS/Circulair/Elektrificatie en H ₂	Steeanol	5-8	2030
CO ₂ -afvang	CCUS/Circulair	CO ₂ -to-methanol	7-8	2030
CO ₂ -afvang	CCUS/Circulair	Carbon Capture and Storage	6-8	2030

Tabel 8 Verwachte TRL-niveaus van technologieën in de staal.

De meeste technologieën worden pas industrieel toepasbaar verwacht vanaf 2030. De effectieve implementatie in Vlaanderen wordt eerder verwacht vanaf 2035. Dit is echter afhankelijk van het voldoen aan (economische)



Figuur 51 Staalproductie technologieën.

randvoorwaarden, die in detail zijn beschreven bij de inleiding van dit hoofdstuk.

Er is een belangrijke rol weggelegd voor innovatie en opschaling om de transitie in de staalsector te realiseren.

Er zijn volgende opportuniteiten geïdentificeerd voor **verdere innovatie en opschaling van technologieën** binnen Vlaanderen en Europa:

- **CCUS**: streven naar hogere efficiëntie door het energieverbruik te verminderen (2 GJ/ton CO₂) en/of via procesintegratie met restwarmte om deze te recupereren uit bestaande processen en nuttig te valoriseren.
- **CCUS**: Efficiënte conversie van CO/CO₂ naar de nieuwe platformmoleculen methanol/ethanol.
- **H₂**: Het verbeteren van de elektrolyse processen (e.g. via SOE) of andere technologieën om een efficiëntie van 90% te benaderen en de productie van H₂ betaalbaarder te maken.

CAPEX

De transitie zal leiden tot hoge investeringsnoden voor zowel de overheid als private ondernemingen in de staalsector. Het totale kostenplaatje kan in het kader van deze studie niet worden ingeschat, enerzijds door een gebrek aan data, maar tevens omdat de scope van deze opdracht maar een beperkt deel van de transitie afdekt.

De verschillende componenten van investeringsnoden zijn als volgt:

- Investeringsnoden in de energieproductie en het energiesysteem (buiten de scope van onze opdracht - niet berekend, maar de verwachting is wel dat dit aanzienlijk zal zijn).⁷⁸ Dit is wel onrechtstreeks opgenomen in de OPEX inschattingen via de elektriciteitsprijs (die stijgt omwille van de assumptie dat de investeringen in het elektriciteitssysteem integraal worden doorgerekend).
- Uitrol van nieuwe productietechnologieën (inschatting gemaakt).
- Kosten voor CO₂ afvang (inschatting gemaakt).
- Investeringsnoden om het huidige productiepark op peil te houden tot en met 2050 (onderhoud en renovatie/vervanging van huidige productiepark)⁷⁹ (niet berekend wegens gebrek aan data).
- Investeringsnoden voor (publieke) infrastructuur, waaronder transportnetwerken voor H₂ en CO₂-transport, opslag van CO₂ en importnetwerken (niet berekend daar dit sterk afhankelijk is van de dimensionering van deze infrastructuur en zeer tracé-afhankelijk).

Voor wat het aandeel van vereiste investeringen (CAPEX) voor de implementatie van de gekozen klimaatneutrale technologieën betreft, worden deze ingeschat tussen de €1,3 en 2,9 miljard tussen nu en 2050, waarvan rond de €500 miljoen in de toepassing van nieuwe productietechnologieën (IGAR-technologie) en €813 tot 2,4 miljard voor CO₂-afvang (excl. transport en opslag)⁸⁰.

⁷⁸ De VNCI 'Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050' van Ecofys en Berenschot (2018) schat in dat van € 63 miljard voor de transitie van de Nederlandse chemische industrie, meer dan de helft (€ 37 miljard) in de energiesector zit.

⁷⁹ omdat er onvoldoende info beschikbaar is over de vereiste investeringen hiervoor

⁸⁰ Deze brede range voor CO₂-afvang komt door zeer sterk uiteenlopende inschattingen in de geraadpleegde wetenschappelijke bronnen. Zie ook Appendix D.

De investeringen voor de uitrol van Steelanol zijn aangerekend bij de chemiesector (onder ethanolproductie). Deze investeringen houden geen rekening met investeringen voor infrastructuur en aanpassingen aan bestaande installaties. Daarenboven houden we geen rekening met de nodige investeringen in het energiesysteem. De €500 miljoen houdt rekening met de investering voor de toepassing van IGAR-technologie. Torrero wordt gesimuleerd als een fuel switch, en wordt daardoor nu niet meegenomen in de methodologie.

Sectorkoppeling

Vanuit de staalsector is er een sectorkoppeling mogelijk naar de chemische waardeketens doordat gecapteerde restgassen CO en CO₂ uit de hoogovens kunnen worden ingezet als feedstock voor ethanol en methanol, die op hun beurt kunnen dienen als basisproduct in de HVC-productie, als substituuut voor nafta.

In ons centraal verkenningsscenario zal 5% van naftastoomkraken in de Vlaamse chemie productiecapaciteit voor HVC's worden vervangen door ethanol (ethanol dehydrogenatie, waarbij 75% van de vereiste ethanol wordt geproduceerd via de Steelanol route), en 10% door methanol (via alternatieve productieroute met CO₂) en H₂, en vervolgens MTO/MTA).

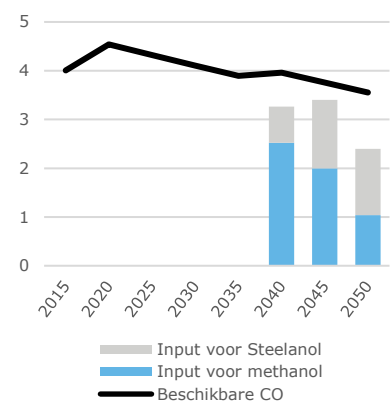
Deze koppeling kan gerealiseerd worden door ArcelorMittal, het staalbedrijf uit Gent, te koppelen met chemische bedrijven DOW en Yara net over de grens in Terneuzen en allen gelegen op het grondgebied van North Sea Port (dit kadert in de initiatieven van Smart Delta Resources). Zij kunnen symbioses zoeken door zowel restgassen van CO/CO₂ als H₂ onderling uit te wisselen. Een belangrijke randvoorwaarde hierbij is wel dat de nodige pijpleidinginfrastructuur wordt gerealiseerd om alle sites te verbinden. Een alternatief is om de aansluiting te maken met de chemische cluster in het Antwerpse havengebied.

Het is nog verder te bekijken in hoeverre de sectorkoppeling zich zal realiseren, aangezien de chemiesector zelf enorme hoeveelheden CO₂ ter beschikking zal hebben.

Naast het hergebruik van overtollig restgas zijn er nog andere sectorkoppelingen die momenteel reeds leiden of in de toekomst kunnen leiden tot vermeden emissies:

- Het huidige gebruik van staalslakken in de cementsector.
- Het gebruik van afval als input in de hoogovens vermindert het afval dat uiteindelijk wordt gestort of verbrand.
- Enige overtollige CO dat uitgestoten wordt kan ook hergebruikt worden in de elektriciteitsproductie, zoals nu ook al gebeurt.

Deze bijkomende positieve effecten zijn niet in het reductiepercentage van emissies opgenomen voor de staalsector in dit rapport.



Figuur 52 Beschikbaarheid en gebruik van CO uit staalproductie (in TWh)

Overige industrieën



Figuur 53 Overzicht implicaties overige industrieën.

Samenvatting

De overige industrieën, zoals o.a. papier, voeding en non-ferro, hebben verschillende kenmerken t.o.v. de bedrijven uit de chemie-, raffinage-, en staalsector:

- Vele van de bedrijven uit andere industrieën zijn niet **gelokaliseerd** in een industriële cluster in een havengebied of in de regio van het Albertkanaal. Typisch zijn deze bedrijven meer **geïsoleerd**, verspreid over Vlaanderen. Daarnaast hebben ze kleinere emissiebronnen. Voor de bedrijven die wel meer in een cluster gelegen zijn moeten de mogelijkheden bekeken worden om netwerken uit te breiden naar nabijgelegen bedrijven.
- De meeste bedrijven worden gekenmerkt door een **minder grote CO₂-emissies** dan de bedrijven uit de chemie-, raffinage-, en staalsector.

De combinatie van een lagere CO₂-emissies en een lagere clustering zorgt ervoor dat de meeste bedrijven minder snel toegang zullen hebben tot nieuwe infrastructuur, zoals H₂- en CO₂-afvang pijpleidingen omdat het niet kostenefficiënt zou zijn om deze netwerken volledig aan te leggen voor één enkel bedrijf. Dit sluit per definitie uit dat er een groot potentieel is voor CO₂-afvang voor de andere industrieën met uitzondering voor de processen die gebruik maken van middelhoge temperaturen (voornamelijk chemische bedrijven).

Deze bedrijven worden grotendeels gekenmerkt door het verbruik van elektriciteit en warmte. Deze sectoren zijn dan ook op vereenvoudigde wijze gesimuleerd: voor elke sector is gekeken naar de specifieke elektriciteits- en warmteconsumptie (o.b.v. het brandstofverbruik) per temperatuur categorie. Daarbij hebben we de volgende categorieën gehanteerd:

Sector	Type warmte
<ul style="list-style-type: none"> • Voeding • Papier (primair en secundair) 	Lage temperatuur (< 200°C)
<ul style="list-style-type: none"> • 'Andere' chemische bedrijven (i.e. bedrijven zonder HVC's, ammoniak, chloor, H₂ en syngas) 	Middelhoge temperatuur (200-400°C) → Behandeld onder de sectie 'Chemie'
<ul style="list-style-type: none"> • Glas • Non-ferro • Keramiek 	Hoge temperatuur (> 400°C)

Tabel 9 Indeling overige industrieën in deze studie.

Voor de warmteopwekking is er van uit gegaan dat deze wordt opgewekt in boilers met een efficiëntie van 85% en met aardgas als voornaamste brandstof (enkel voor hoge temperatuurwarmte is er ook uitgegaan van kleine hoeveelheden vloeibare brandstoffen en biomassa). Naar de toekomst

toe kan de warmtevraag ingevuld worden door overschakeling op elektrische boilers, of door vervanging van aardgas door bio-methaan en/of synthetische brandstoffen.

Vermits de meer verspreide emissies t.o.v. de chemie-, raffinage-, en staalsector alsook de sterkere veronderstelde productiegroei is het potentieel voor emissiereducties voor deze sectoren relatief gezien kleiner in het centraal verkenningsscenario. Het reductiepotentieel voor de voedings- en papiersector (lage temperatuur) wordt geschat op 62% t.o.v. 2005 (van 2,25 Mton broeikasgassen in 2005 tot 0,85 Mton in 2050), terwijl de productie stijgt met respectievelijke +50% en +20%. Voor hoge temperaturen is het reductiepotentieel nog lager met een geanticipeerde daling van 43% in 2050 t.o.v. 2005.

De reducties kenmerken zich voornamelijk door een fuel switch van aardgas naar bio-, syn-brandstoffen en elektrificatie. Het potentieel voor elektrificatie is voornamelijk aanwezig voor lage temperaturen. Voor hoge temperaturen betekent elektrificatie een veel te groot rendementsverlies en dient er gekeken te worden naar bio- en syn-brandstoffen. Het potentieel voor CO₂-afvang is door de diffusie van deze sectoren (vele, verspreide emissiepunten) zeer beperkt, en hier wordt in het verkenningsscenario dan ook niet op ingezet.

Aangezien de elektriciteitsprijs in Vlaanderen hoger is t.o.v. de andere energiedragers, kan elektrificatie een sterke invloed hebben op de exploitatiekosten van deze bedrijven en hun competitieve karakter.

De realisatie van dit centraal verkenningsscenario is wel gelinkt aan belangrijke **randvoorwaarden**:

- De prijs van energiedragers, zoals elektriciteit, zullen leidend zijn voor de keuzes die de bedrijven maken in de transitie. Deze prijzen dienen competitief gemaakt te worden t.o.v. andere energiedragers om elektrificatie te faciliteren.
- De infrastructurele beperkingen voor kleinere sectoren dienen erkend te worden en er dient een specifieke strategie uitgewerkt te worden voor hen.
- Er moet 'out of the box' en vanuit een holistisch systeem gedacht worden om de transitie in te zetten. Er kan bijvoorbeeld onderzocht worden of restwarmte van de industrie in de residentiële sector kan worden ingezet. Hier is een belangrijke rol voor innovatie en beleid.

Productievolumes

In de meeste sectoren wordt uitgegaan van een productiestijging t.o.v. 2015:

- Het productieniveau van de voedingssector stijgt met 50% tussen 2050 en 2015, in lijn met de historische trend. Door een verdere bevolking aangroei wordt verwacht dat de vraag naar voedingsproducten ook in de toekomst zal blijven stijgen.
- Het productieniveau van de papiersector stijgt beperkter met 20% tegen tussen 2015 en 2050 door een combinatie van bevolking aangroei en dus stijgende vraag naar (sanitaire) papierproducten enerzijds, en een verdere digitalisering en dus een dalende vraag naar papierproducten anderzijds.

- Voor keramiek wordt eveneens een stijgende productie (+40% tussen 2005 en 2050) verwacht, ten gevolge van stijgende bouw- en renovatieactiviteiten in de bouwsector.
- Voor non-ferro metalen wordt uitgegaan van een stabiele productie.
- Voor glas wordt uitgegaan van een lichte daling (-10% tussen 2015 en 2050) in lijn met de historische trend van het laatste decennium.

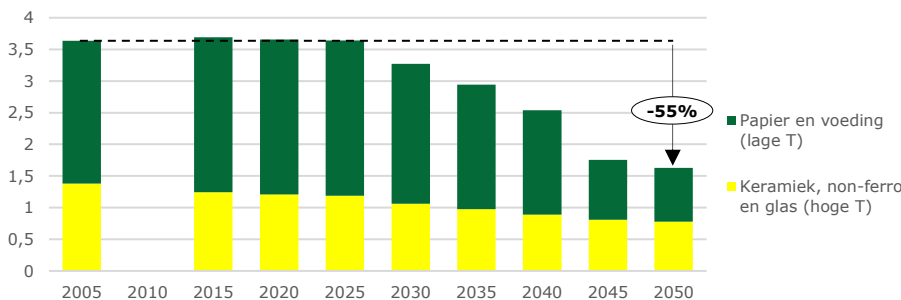
Evolutie van emissies

Het reductiepotentieel voor de kleinere sectoren (op vlak van broeikasgasemissies) wordt ingeschat op 55%, van 3,6 Mton broeikasgassen in 2005 tot 1,6 Mton in 2050.

Het reductiepotentieel voor lage temperatuurwarmte (in de voeding- en papiersector) wordt iets hoger ingeschat op 62% t.o.v. 2005 (van 2,25 Mton broeikasgassen in 2005 tot 0,85 Mton in 2050), terwijl de productie sterk toeneemt (respectievelijk +50% en +20%).

Voor hoge temperaturen is het reductiepotentieel lager met een geanticipeerde daling van 43% in 2050 t.o.v. 2005.

De voornaamste reducties worden ingezet vanaf 2030 door de toepassing van elektrificatie en overschakeling op bio- en syn-brandstoffen. De reducties in de jaren voordien worden gerealiseerd door efficiëntiewinsten.



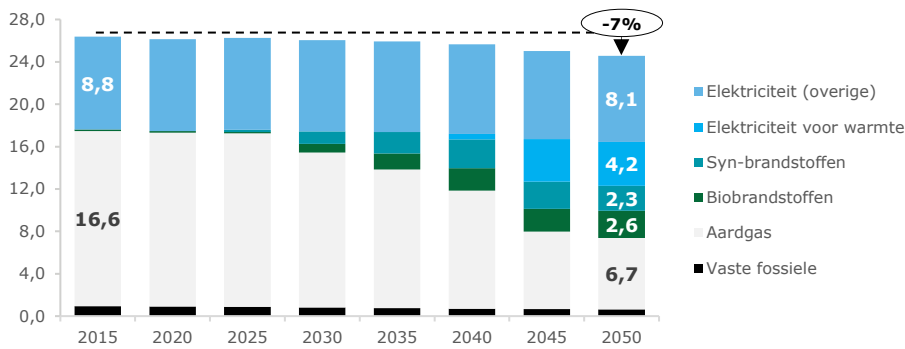
Figuur 54 Broeikasgasemissies overige industrieën in het voorgestelde verkenningsscenario (in Mton).

Evolutie van energievraag

Over alle kleinere sectoren heen zakt ondanks een algemene productiestijging, het totale energieverbruik met 7% tussen 2015 en 2050, van 26,4 TWh in 2015 tot 24,6 TWh in 2050. Voornaamste verklaring hiervoor zijn ambitieuze efficiëntieverbeteringen:

- De efficiëntie op vlak van algemeen elektriciteits- en warmteverbruik verbetert met 1% per jaar.
- De efficiëntie op vlak van warmteopwekking verbetert van 85% in 2015 tot 90% in 2050 voor wat betreft brandstofboilers. Voor elektrische boilers ligt het rendement met 95% nog hoger.

Naast een algemene, beperkte daling van het energieverbruik zien we een belangrijke shift in energiedragers: het elektriciteitsverbruik neemt toe met 40% van 8,8 TWh in 2015 tot 12,3 TWh in 2050, voornamelijk door elektrificatie van de warmteproductie. Anderzijds daalt het aardgasverbruik met 60% van 16,6 TWh in 2015 tot 6,7 TWh in 2050, door een combinatie van elektrificatie, biobrandstoffen en syn-brandstoffen.



Figuur 55 Energieverbruik en energiedragers in de overige industrieën in het voorgestelde verkenningsscenario (in TWh).

Evolutie technologie-aandeel

Het centraal verkenningsscenario kijkt naar de volgende drie thema's van technologieën om de transitie te realiseren:

- **Elektrificatie van boilers:** Ongeveer 20% van de totale warmte kan potentieel worden geëlektrificeerd (na kleinschalige succesvolle demonstraties dient dit opgeschaald te worden voor industriële toepassingen vanaf 2035). Nader bepaald is dit:
 - 40% van boilers voor lage temperatuurwarmte.
 - 20% van boilers voor middelhoge temperatuurwarmte.
 - 0% van boilers voor hoge temperatuurwarmte.
- **Gebruik van syn-brandstoffen of e-methaan.** Ongeveer 20% van totale warmte kan via syn-brandstoffen of bio-methaan worden opgewekt (voornamelijk voor bedrijven buiten industriële clusters). Dit kan als volgt worden weergegeven:
 - 20% van boilers voor lage temperatuurwarmte.
 - 22,5% van boilers voor middelhoge temperatuurwarmte.
 - 20% van boilers voor hoge temperatuurwarmte.
- **Gebruik van biomassa (*).** Ongeveer 20% van de totale warmte kan via biomassa worden opgewekt (voornamelijk voor bedrijven buiten industriële clusters met gebruik van hoofdzakelijk bio-methaan):
 - 20% van boilers voor lage temperatuurwarmte.
 - 10% van boilers voor middelhoge temperatuurwarmte.
 - 20% van boilers voor hoge temperatuurwarmte (voornamelijk bio-methaan maar ook vloeibare en vaste biomassa).

Daarnaast wordt ook CO₂-afvang toegepast bij boilers van middelhoge temperatuurwarmte, aangezien dit 'andere' chemische bedrijven betreffen met toegang tot een cluster. Dit begint vanaf 2035, waarna het lineair groeit tot 60% van de totale CO₂-emissies van dergelijke boilers. Voor lage en hoge temperatuurwarmte wordt dit niet realistisch geacht omdat deze boilers voornamelijk in installaties worden gebruikt die buiten industriële clusters liggen. Hier zou CO₂-afvang economisch niet rendabel zijn wegens de hoge CAPEX kosten voor het bouwen van de CO₂-afvang infrastructuur.

(*) Er zijn betere valorisatiepistes dan het inzetten van biomassa voor louter energiedoelinden en dit zal één van de laatste opties zijn voor bedrijven die weinig andere mogelijkheden hebben.

Routes en technologische innovaties

De **huidige toepassingen** van technologieën in de andere industrieën zijn als volgt:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Warmte	Referentie	Elektrische boilers lage/midden T	8-9	-

Tabel 10 Huidige technologieën gesimuleerd voor de Vlaamse andere industrieën.

Volgende technologieën zijn verder **gesimuleerd** in het centraal verkenningsscenario, in combinatie met huidige technologieën:

Categorie	Route	Technologie	Huidig TRL-niveau	Inschatting tot TRL9
Warmte	Elektrificatie	Elektrische boilers hoge T	3-4	2040
CO₂-afvang	CCUS	CCS lage concentratie	6-8	2035

Tabel 11 Verwachte TRL-niveaus van technologieën in de andere industrieën.

Er zijn volgende opportuniteiten geïdentificeerd voor **verdere innovatie en opschaling van technologieën** binnen Vlaanderen en Europa:

- Efficiëntie verhogen van elektrificatietechnologieën om concurrentieel te worden met de lage aardgasprijzen.
- Er is een R&D-uitdaging om hogere temperaturen te elektrificeren.
- Het goedkoper maken van syn- en biobrandstoffen.

CAPEX

Voor de elektrificatie van boilers voor lage en middelhoge temperatuur is geen CAPEX-berekening gemaakt. De CAPEX kosten voor deze boilers zijn gelijkaardig zijn aan die van brandstofboilers, die ook om de paar jaar vervangen dienen te worden.

Sectorkoppeling

Voor bedrijven gelegen buiten grote industriële cluster is gebruik van CC(U)S moeilijk alsook toegang tot H₂-netwerken of geïntegreerde stoom-netwerken.

Een belangrijkere rol is er weggelegd voor het systeemdenken rond energie. Deze bedrijven zijn typisch meer gelokaliseerd buiten grote industriële clusters, soms dicht bij een woonwijk of gebouwen uit de tertiaire sector (e.g. zwembaden, gevangenissen, ...). Er zouden grotere synergieën kunnen gezocht worden door de aansluiting te maken tussen de warmtevraag in andere sectoren met mogelijke restwarmte uit deze bedrijven zodat de restwarmte nuttig gevaloriseerd kan worden. Uiteraard dienen de warmteprofielen op elkaar afgestemd te zijn en zal er nood zijn aan financiering van de verbindende infrastructuur. Er zijn echter interessante binnenlandse en buitenlandse voorbeelden met betrekking tot de toepassing van deze synergie.

Varianten op het centraal verkenningsscenario

De graad van verwezenlijkte innovatie en kostprijs van de technologie alsook de verschillende marktprijzen van de energiedragers en feedstocks zullen bepalend zijn hoe de toegepaste technologie mix er in 2050 uit zal zien. Om dit in kaart te brengen zijn er - vertrekkende van het centraal verkenningsscenario (**MIX**) - twee 'varianten' uitgewerkt en gesimuleerd. Daarbij zijn de assumpties inzake de prijsontwikkeling van bepaalde energiedragers aangepast, en in functie daarvan de technologiemix waar relevant aangepast t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**). Wel dient benadrukt te worden dat dit geen optimalisatieoefening is: het gehanteerde model kiest immers niet automatisch voor die technologiemix die het meest kostenefficiënt is o.b.v. de gehanteerde assumpties inzake de prijsontwikkeling van bepaalde energiedragers. In plaats daarvan is er een kwalitatieve en in beperkte mate kwantitatieve inschatting gemaakt van welke technologieën goedkoper/duurder zouden worden onder verschillende prijsassumpties, en op basis daarvan is de technologiemix in de twee varianten aangepast t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**).

Concreet werd daarbij de volgende aanpak gehanteerd:

- In een **eerste variatie (Var1)** zou de elektriciteitsprijs minder en de prijs van fossiele energiedragers meer stijgen t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**). Hieruit volgend wordt er meer ingezet op elektrificatietechnologieën, en minder op fossiele energiedragers in combinatie met carbon capture.
- In een **tweede variatie (Var2)** zou de elektriciteitsprijs meer stijgen t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**) en de prijs van fossiele energiedragers dalen t.o.v. de huidige prijzen. Hieruit volgend wordt er minder ingezet op elektrificatietechnologieën, en meer op fossiele energiedragers in combinatie met carbon capture.

Zie Appendix D voor de verschillende prijsassumpties die zijn gehanteerd per energiedrager, alsook de koolstofprijs die is gehanteerd om de koolstofkost van de resterende emissies te berekenen.

Verschuiving technologiemix

De prijsimplicaties van deze twee varianten hebben ook een invloed op de mate waarop technologieën in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) worden toegepast.

In de **eerste variant**, met lage elektriciteitsprijzen, is er uitgegaan van volgende wijzigingen:

- De huidige nafta stoomkrakers worden grotendeels (65%) vervangen door elektrificatietechnologieën waaronder voornamelijk het elektrisch kraken van nafta (via schokgolfttechnologie), en voor het overige door chemische recyclage van kunststofafval (35%). T.o.v.

van het centraal verkenningsscenario (**MIX**) wordt er geen gebruik meer gemaakt van methanol/ethanol/biogebaseerde technologieën. De ammoniak zal voor 50% worden geproduceerd door groene H₂ (i.p.v. 40% in het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Doordat er niet wordt ingezet op ethanol/methanol routes stijgt de vraag naar H₂ minder sterk dan in het centraal verkenningsscenario (**MIX**), waardoor deze volledig kan ingevuld worden via binnenlandse productie. Voor deze productie wordt de huidige SMR-capaciteit wordt voor 50% vervangen door elektrolyse (en nog 10% door methaanpyrolyse, vanwege de sectorkoppeling met staal). De warmteopwekking voor de productie van 'andere chemicaliën) wordt voor 50% geëlektrificeerd.

- **Raffinage:** sterker ingezet op verwarming via elektrificatie t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**) (60% i.p.v. 40%).
- **Staal:** Er wordt meer ingezet op de gedeeltelijke vervanging van steenkool door (turquoise) H₂ (20% i.p.v. 14,5%).
- **Overige industrieën:** Er wordt sterker ingezet op de elektrificatie voor lage temperaturen (75% versus 40% in het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Daarnaast is er ook een rol voorzien voor elektrificatie van hoge temperatuurwarmte, waar dit niet voorzien is in het verkenningsscenario.
- **Productie van syn-brandstoffen:** Alle syn-brandstoffen zullen lokaal geproduceerd o.b.v. groene H₂ (t.o.v. 25% import onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Doordat deze brandstoffen niet ver moeten getransporteerd worden, zullen ze grotendeels koolstofvrij zijn (voornamelijk zuivere H₂).

In de **tweede variant**, met hogere elektriciteitsprijzen, is er uitgegaan van volgende wijzigingen:

- **Chemie:** Er wordt geen elektrificatie toegepast voor de productie van HVC's. Één derde van huidige nafta stoomkraker capaciteit wordt behouden in 2050, maar uitgerust met CO₂-afvang technologie. De overige 2/3 wordt vervangen door een combinatie van circulaire-, biogebaseerde- en CCU-technologieën. De overige emissies van HVC-productie worden voor 90% afgevangen (t.o.v. 80% onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Ook voor ammoniakproductie wordt er geen elektrificatie voorzien, maar wordt ook in 2050 nog enkel de Haber-Bosch route toegepast (met toepassing van CO₂-afvang). Ook in deze variant stijgt de vraag naar H₂ minder sterk dan in het centraal verkenningsscenario (**MIX**). De huidige SMR-capaciteit wordt behouden en uitgerust met CO₂-afvang technologie (blauwe H₂), en beperkt aangevuld met turquoise H₂ via methaanpyrolyse. De overige vraag naar H₂ wordt ingevuld door import, er is geen groene H₂-productie via elektrolyse.
- **Raffinage:** Er wordt niet meer ingezet op een switch van aardgas (warmte + elektriciteitsproductie in WKK's) naar elektriciteit (rechtstreekse afname van het net en gedeeltelijke elektrificatie van de warmteproductie).
- **Staal:** Er wordt geen H₂ ingezet in de hoogovens.
- **Overige industrieën:** Er is geen rol voorzien voor elektrificatie van warmte.
- **Productie van synthetische brandstoffen:** alle geconsumeerde syn-brandstoffen worden geïmporteerd (geen eigen productie). Omdat deze makkelijk te transporteren zijn, zijn de meeste syn-

brandstoffen koolstof gebaseerd (voornamelijk synthetisch methaan).

Resultaten algemeen

Door de verschillen in de energie- en feedstockmix en de indirecte verschuivingen in applicaties van technologieën binnen het centraal verkenningsscenario (**MIX**), is de impact op de emissiereducties tegen 2050 relatief beperkt. Enkel voor de kleinere sectoren – waar er geen CO₂-afvang wordt toegepast – heeft de elektrificatiegraad een significante impact op de resterende emissies in 2050. Dit komt ook omdat het aandeel CO₂ afvang van de bruto-emissies van de grote puntbronnen in de 3 scenario's op een gelijkaardig niveau gehouden is (tussen 80 en 90%, met een iets hogere inzet onder Variant 2).

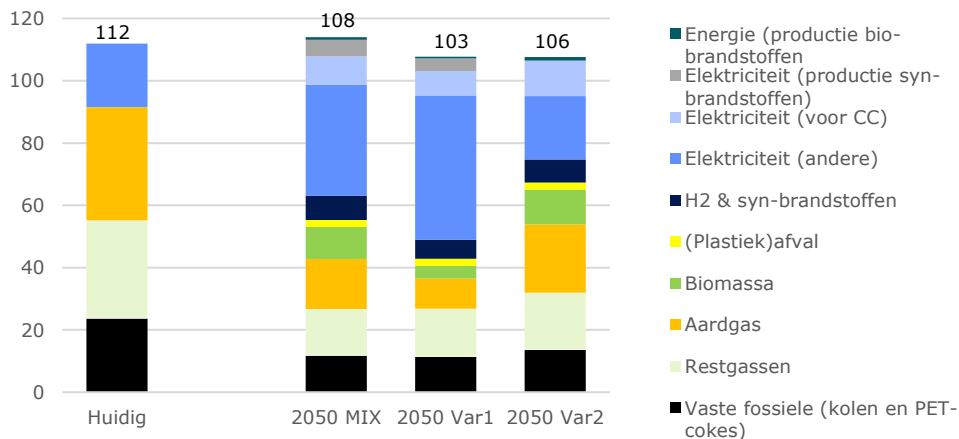
Evolutie van emissies	MIX-scenario	Variant 1	Variant 2
Overige sectoren	-55%	-75%	-39%
Raffinage	-88%	-88%	-86%
Staal	-92%	-93%	-94%
Chemie	-90%	-94%	-95%
TOTAAL	-86,4%	-90,4%	-86,2%

Tabel 12 Overzicht van de verschillen in de emissiereducties (t.o.v. 2005) met de varianten.

Ook de energievraag wordt in sterke mate bepaald door de technologische keuzes die worden aangenomen. Terwijl het totale energieverbruik onder de twee varianten niet sterk wijzigt t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**), zien we wel een verschuiving in energiedragers⁸¹:

- Onder de eerste variant verdrievoudigt het elektriciteitsverbruik t.o.v. het huidige niveau. Onder de tweede variant neemt het elektriciteitsverbruik met 1/3 toe t.o.v. het huidige niveau, voornamelijk ten gevolge van de toepassing van carbon capture technologie. **Over de verschillende scenario's heen stijgt de elektriciteitsvraag dus met minimaal 33% en maximaal 200% t.o.v. het huidige verbruik.**
- Anderzijds daalt onder de eerste variant het energetisch aardgasverbruik verder t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**), tot op een niveau in 2050 dat 75% lager ligt dan het huidige verbruik. Onder de tweede variant neemt het aardgasverbruik toe t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**), maar ligt dit in 2050 nog steeds 40% onder het huidige niveau. **Over de verschillende scenario's heen zien we dus een daling in het energetisch aardgasverbruik, gaande van -40% tot -75% t.o.v. het huidige niveau.**

⁸¹ **Figuur 56** geeft enkel de syn-brandstoffen weer die worden geïmporteerd. De syn-brandstoffen die hier worden geproduceerd zijn niet weergegeven om dubbeltellingen met het elektriciteitsverbruik te vermijden.



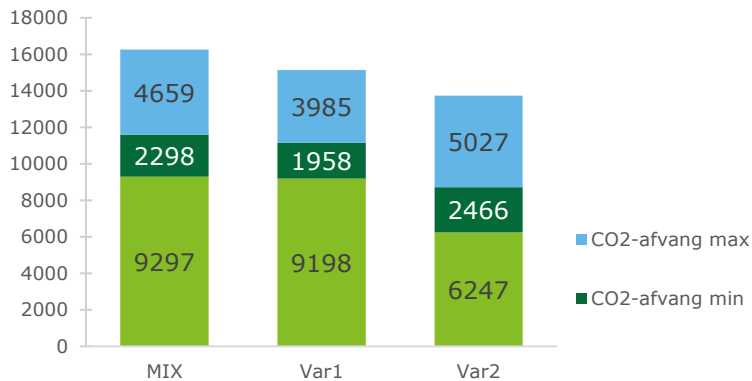
Figuur 56 De evolutie in energieverbruik (finaal + energie voor productie van syn- en bio-brandstoffen) per drager (exclusief feedstocks) in het centraal verkenningsscenario (MIX) en diens twee varianten (in TWh). De totalen bovenaan geven enkel het finaal energieverbruik weer (excl. Energie voor productie van bio- en syn-brandstoffen)

Het ingeschatte deel van investeringsnoden (CAPEX)⁸² gerelateerd aan de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën onder **de eerste variant** liggen op een gelijkaardig niveau als onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**). De **hogere investeringen in elektrificatietechnologieën (+ €3 miljard t.o.v. centraal verkenningsscenario (MIX))** worden gecompenseerd door **lagere investeringen in andere technologieën**, en in het bijzonder de waardeketen voor HVC-productie o.b.v. ethanol en methanol (- €2,5 miljard t.o.v. centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Ook de benodigde investeringen in CO₂-afvang technologie ligt iets lager.

Voor **de tweede variant liggen deze investeringsnoden bijna 25% lager dan onder het centraal verkenningsscenario (MIX)** (€9 miljard vs. €12 miljard over de gehele periode 2020-2050). Dit valt - althans gedeeltelijk - te verklaren door het grotere behoud van bepaalde productie-installaties (voornamelijk nafta stoomkrakers en Steam Methane Reformers), waarvoor er onder de gehanteerde methodologie geen investeringskosten worden aangerekend. In werkelijkheid zou de kloof wellicht kleiner zijn, gezien ook het behoud van bestaande productie-installaties bepaalde investeringen vergt voor onderhoud en refurbishment.

Over de verschillende scenario's heen wordt het ingeschatte deel van de investeringsnood gerelateerd aan de implementatie van nieuwe, klimaatvriendelijke productieprocessen en carbon-capture technologie ingeschat tussen €9 en €12 miljard (cumulatief tussen 2020 en 2050).

⁸² De inschatting van de CAPEX voor de varianten is op gelijkaardige wijze gebeurd aan deze van het centraal verkenningsscenario (MIX). Dezelfde componenten zitten wel en niet vervat in deze inschattingen. Meer informatie over de gevolgde methode is terug te vinden op p. 67.

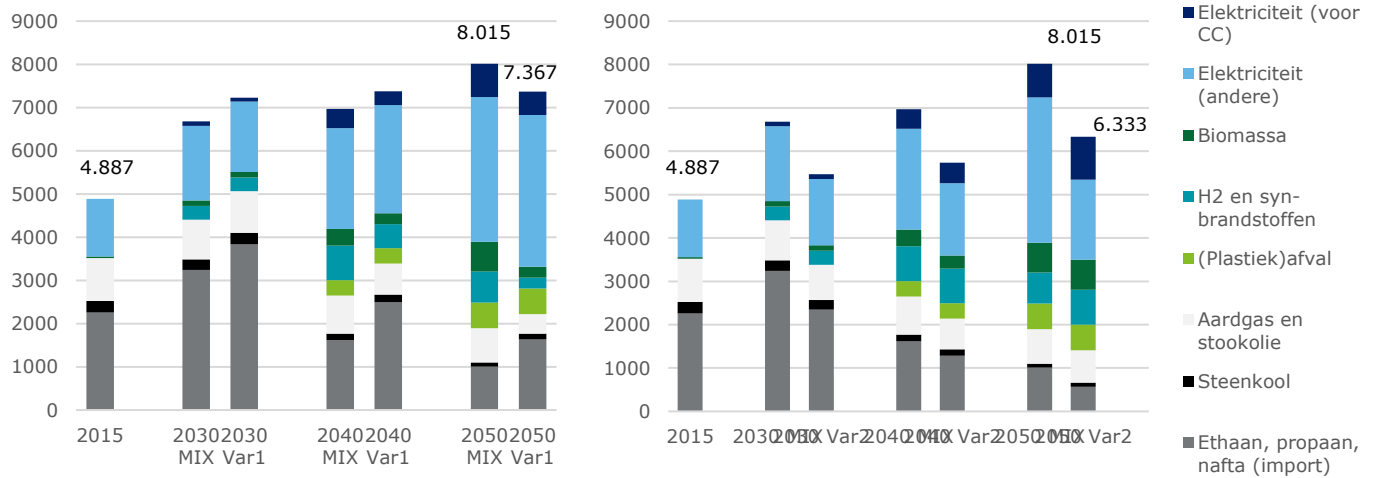


Figuur 57 Geschatte CAPEX-kosten voor het centraal verkenningsscenario (MIX), en diens twee varianten (in EUR2015 miljoen).

De kosten voor brandstoffen en feedstocks zakken in beide varianten ten opzichte van het centraal verkenningsscenario (MIX). In de eerste variant is de daling relatief beperkt (-10% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX) in 2050). De uitgaven voor de elektriciteitsconsumptie blijven relatief gelijk tussen beide scenario's doordat het hogere verbruik (+16%) wordt gecompenseerd door een lagere prijs (-16%). Een daling in de uitgaven voor andere energiedragers en feedstocks (biomassa, syn-brandstoffen, aardgas en nafta) wordt geneutraliseerd door hogere uitgaven voor de import van LPG/propana en ethaan. Door het behoud van HVC-productie o.b.v. LPG/propana en ethaan in combinatie met stijgende prijzen zouden die uitgaven immers stijgen met 60% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX) (van €1 miljard tot €1,6 miljard in 2050). Zonder dit effect zouden de totale uitgaven 16% lager liggen in de eerste variant ten opzichte van het centraal verkenningsscenario (MIX).

Voor de tweede variant is de daling meer uitgesproken (-21% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX) in 2050). Dit komt voornamelijk door een combinatie van volgende effecten:

- Sterke verschillen in de prijsassumpties voor nafta, LPG/propana en ethaan (de prijs bedraagt in 2050 onder de tweede variatie slechts 50% van de prijs onder het centraal verkenningsscenario (MIX)), wat een grote impact heeft gezien deze energiedragers een belangrijke input blijven voor HVC-productie tot en met 2050.
- Een sterke daling (-31% in 2050) in de uitgaven voor elektriciteitsconsumptie t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX), doordat de daling in consumptie veel sterker is dan de stijging in de prijs (+7% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX)).



Figuur 58 Energie- en emissiekosten tussen het voorgesteld toekomst (MIX) scenario en diens twee varianten, Var1 (links) en Var2 (rechts) (in EUR miljoen).

Over alle scenario's heen wordt **een stijging van de energie- en feedstockuitgaven t.o.v. de huidige situatie verwacht**, gaande van +22% (Var2) tot +61% (centraal verkenningsscenario (MIX)).

Chemie: Sensitiviteitsanalyse op basis van de energie- en feedstockprijs

Variant 1 – lagere elektriciteitsprijzen, hogere prijzen voor fossiele brandstoffen

De huidige nafta stoomkrakers worden grotendeels (65%) vervangen door elektrificatietechnologieën waaronder voornamelijk het elektrisch kraken van nafta (via schokgolfttechnologie), en voor het overige door chemische recyclage van kunststofafval (35%). T.o.v. van het centraal verkenningsscenario (MIX) wordt er geen gebruik meer gemaakt van methanol/ethanol/biobaseerde technologieën. De ammoniak zal voor 50% worden geproduceerd door groene H₂ (i.p.v. 40% in het centraal verkenningsscenario (MIX)):

- Voor nafta stoomkrakers wordt geen gebruik meer gemaakt van methanol/ethanol/biobaseerde technologieën. Daar zal 55% van de stoomkrakers worden vervangen door elektrificatie technologieën (voornamelijk schokgolf reactoren) en 35% worden vervangen door circulaire technologieën.
- De ammoniak zal voor 50% worden geproduceerd door groene H₂ (i.p.v. 40% in het centraal verkenningsscenario (MIX)). In tegenstelling tot het centraal verkenningsscenario (MIX), kan hier de volledige H₂-vraag worden voorzien via binnenlandse productie.
- Doordat er niet wordt ingezet op ethanol/methanol routes stijgt de vraag naar H₂ minder sterk dan in het centraal verkenningsscenario (MIX), waardoor deze volledig kan ingevuld worden via binnenlandse productie. Voor deze productie wordt de huidige SMR-capaciteit wordt voor 50% vervangen door elektrolyse (en nog 10% door methaanpyrolyse, vanwege de sectorkoppeling met staal).
- De warmteopwekking voor de productie van 'andere chemicaliën' wordt voor 50% geëlektrificeerd.

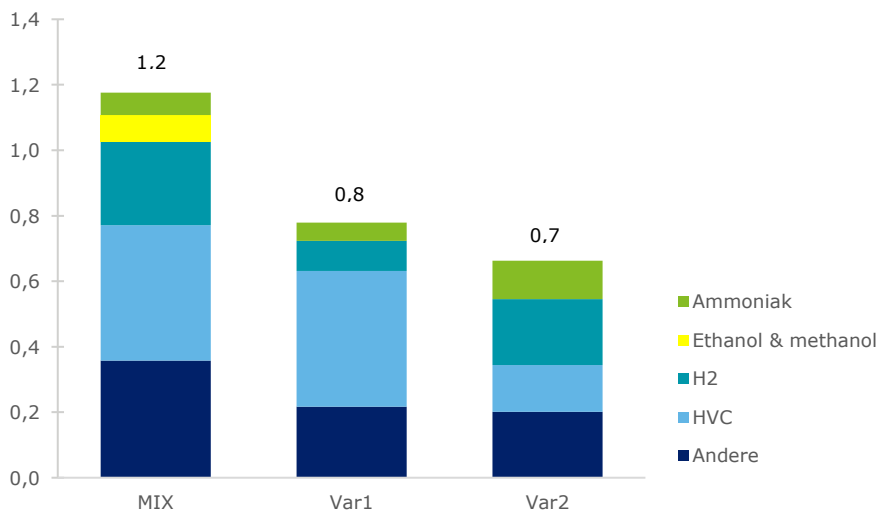
Variante 2 – hoge elektriciteitsprijzen, lagere prijzen voor fossiele brandstoffen

- Voor HVC-productie wordt niet ingezet op elektrificatie technologieën. Één derde van huidige nafta stoomkraker capaciteit wordt behouden in 2050, maar uitgerust met CO₂-afvang technologie. De overige 2/3 wordt vervangen door een combinatie van circulaire-, biogebaseerde- en CCU-technologieën. De overige emissies van HVC-productie worden voor 90% afgevangen (t.o.v. 80% onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**)).
- Ook voor ammoniakproductie wordt er geen elektrificatie voorzien, maar wordt ook in 2050 nog enkel de Haber-Bosch route toegepast (met toepassing van CO₂-afvang).
- De H₂ vraag stijgt minder sterk dan onder het centraal verkenningsscenario (MIX). De huidige SMR-capaciteit wordt behouden en uitgerust met CO₂-afvang technologie (blauwe H₂), en beperkt aangevuld met turquoise H₂ via methaanpyrolyse. De overige vraag naar H₂ wordt ingevuld door import, er is geen groene H₂-productie via elektrolyse.

Resultaten

In beide varianten worden significantere emissiereducties gerealiseerd in de chemiesector t.o.v. het centraal verkenningsscenario (**MIX**):

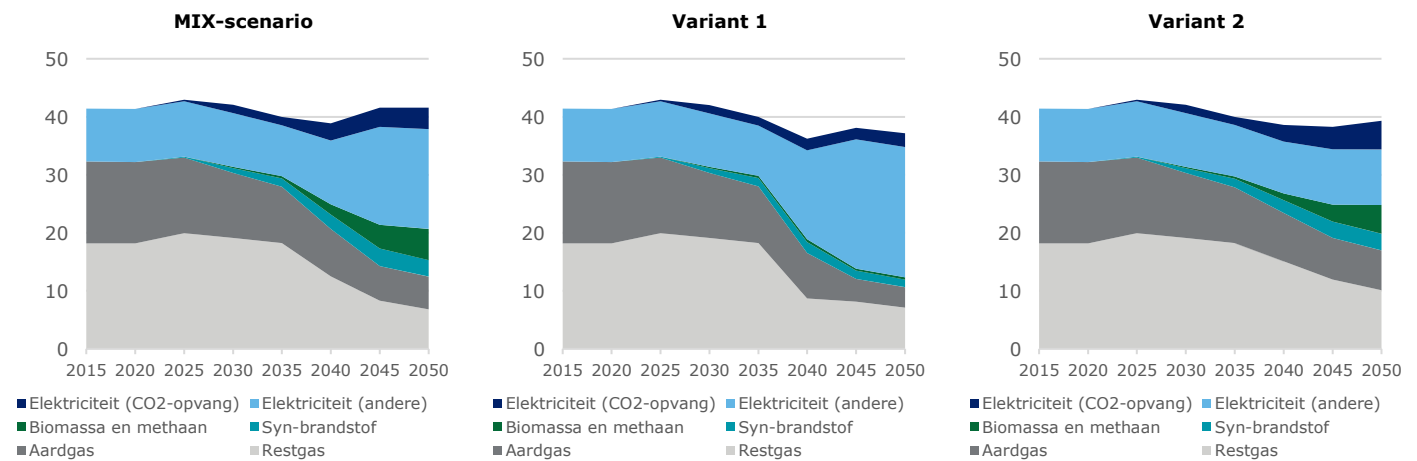
- In de eerste variant komt de sterkere daling voornamelijk door nog scherpere reducties voor H₂-productie (door minder H₂-productie in combinatie met een shift naar elektrolyse) en bij de productie van 'andere chemicaliën' (door elektrificatie van de warmteproductie). Ook is er geen productie van ethanol en methanol, wat leidt tot verdere emissiereducties. Door sterkere inzet op emissievrije technologieën daalt de hoeveelheid CO₂-afvang tegen 2050 tot 2,8 Mton CO_{2eq.} (t.o.v. 4,8 Mton in het centraal verkenningsscenario (**MIX**)).
- In de tweede variant wordt de reductie voornamelijk verwezenlijkt door een hogere mate van CO₂-afvang in de HVC-productie (de totale CO₂-afvang stijgt tot 5,9 Mton CO_{2eq.}) en bij de productie van warmte voor "andere chemicaliën".



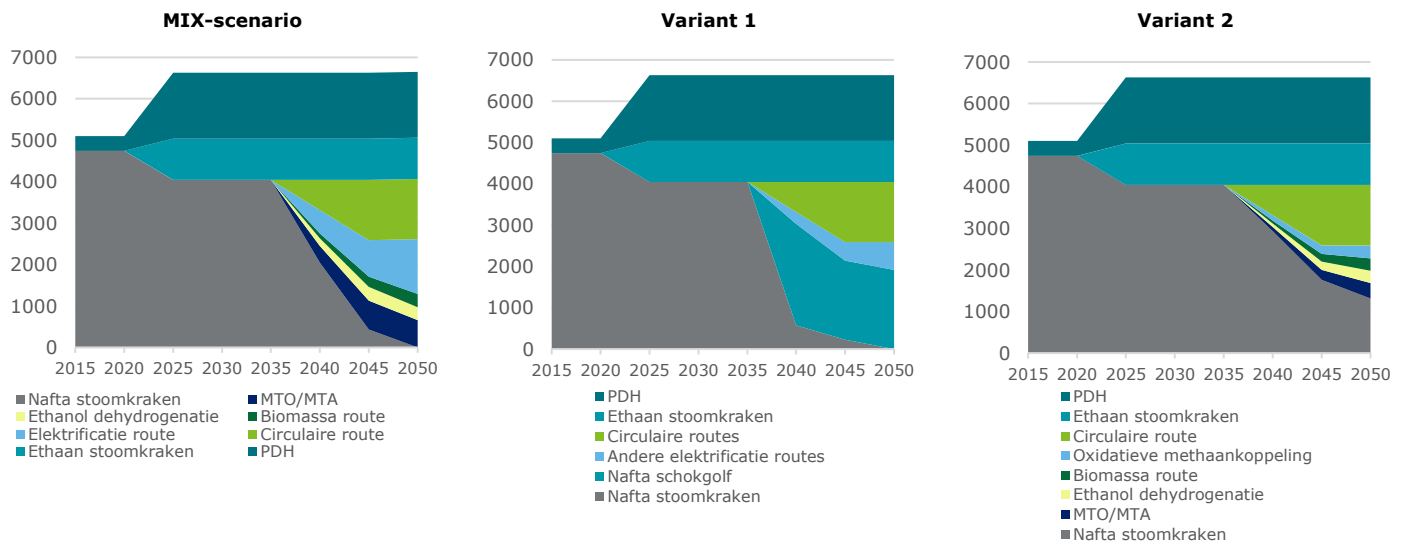
Figuur 59 Geschatte CO₂-emissies per sub-sector in het centraal verkenningsscenario (MIX), en diens twee varianten (in Mton).

In beide varianten is er ook sprake van een beperkte verlaging van het totale energieverbruik, alsook een sterke wijziging in de samenstelling van de energiemix:

- In de eerste variant daalt het totale energieverbruik in 2050 met -10% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX). Dit omdat bepaalde elektrificatietechnologieën efficiënter zijn dan andere technologieën, en omdat er minder bijkomende energiebehoefte is voor CO₂-afvang. De samenstelling van de energiemix wijzigt wel sterk: de elektriciteitsvraag stijgt sterk t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX) (+20%, tot 24,9 TWh n 2050), terwijl de consumptie van aardgas maar ook van bio- en syn-brandstoffen sterk afneemt (-65% in 2050 t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX)). Het energetisch gebruik van restgassen in 2050 blijft min of meer stabiel, doordat deze voornamelijk plaatsvinden in de ethaanstoomkraker en de PDH-eenheden die ook in 2050 nog actief zullen zijn.
- In de tweede variant daalt het energieverbruik eveneens, maar minder sterk als onder de eerste variant (-5% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX)). Dit komt voornamelijk door een lagere vraag naar H₂, zowel binnen de chemie (door een lagere inzet van methanol en ethanol als bouwsteen voor HVC-productie) als in de staalsector. Het elektriciteitsverbruik daalt met 30% t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX), en zelfs met 45% indien het elektriciteitsverbruik voor CO₂-afvang buiten beschouwing wordt gelaten. Anderzijds is er een sterke toename in het verbruik van fossiele energiedragers t.o.v. het centraal verkenningsscenario (MIX), meer bepaald aardgas (+20% in 2050) en restgassen in de HVC-productie (+50% in 2050).



Figuur 60 Energieverbruik in de chemie (TWh) in het centraal verkenningsscenario (MIX) en diens varianten.



Figuur 61 Aandeel technologieën voor de HVC-productie (kton) in het centraal verkenningsscenario (MIX) en diens varianten.

Raffinage: Sensitiviteitsanalyse op basis van de energie- en feedstockprijs

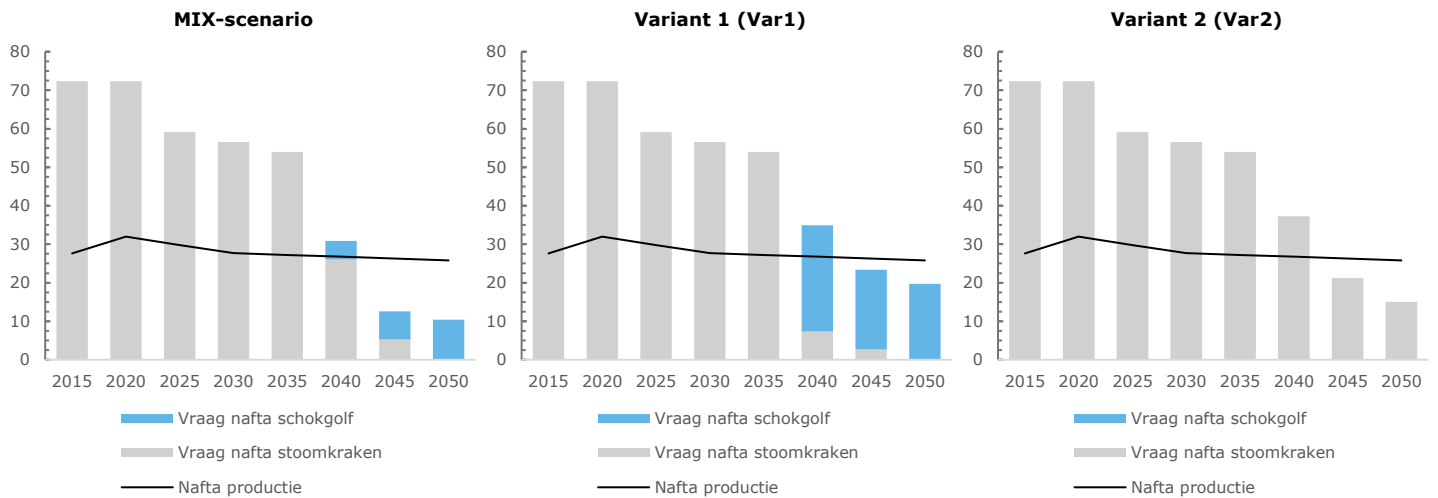
Variant 1 – lagere elektriciteitsprijzen, hogere prijzen voor fossiele brandstoffen

- Onder deze variant wordt nog verder ingezet op de vervanging van aardgas (die wordt ingezet in WKK's) door elektriciteit (tot 60% in 2050 t.o.v. 40% in het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Hierbij wordt ervan uit gegaan dat in plaats van zelf elektriciteit en warmte op te wekken in WKK's, raffinaderijen meer (emissievrije) elektriciteit rechtstreeks zullen afnemen van het net en tot 20% van hun warmteproductie elektrificeren.
- Alle syn-brandstoffen zullen lokaal geproduceerd o.b.v. groene H₂ (t.o.v. 25% import onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Doordat deze brandstoffen niet ver moeten getransporteerd worden, zullen ze grotendeels (75%) koolstofvrij zijn (voornamelijk zuivere H₂), t.o.v. 50% in het centraal verkenningsscenario (**MIX**).

Variant 2 – hoge elektriciteitsprijzen, lagere prijzen voor fossiele brandstoffen

- Onder deze variant wordt de elektriciteitsbehoefte van raffinaderijen ook tot 2050 voornamelijk ingelost door autoproduktie in WKK's o.b.v. aardgas en andere gasvormige brandstoffen. De emissies die hierbij vrijkomen worden wel afgevangen (80% tegen 2050). Er wordt niet overgeschakeld naar verhoogde import van elektriciteit van het net, noch op elektrificatie van warmte.
- Alle geconsumeerde syn-brandstoffen in de verschillende industriële sectoren worden geïmporteerd (geen eigen productie). Omdat deze makkelijk te transporteren zijn, zijn de meeste synthetische brandstoffen koolstof gebaseerd (75%, voornamelijk synthetisch methaan).

Resultaten



Figuur 62 Nafta vraag en aanbod en productiewijze in het centraal verkenningsscenario (MIX) en diens twee varianten (in TWh).

De varianten leiden ook tot een minder sterke ontkoppeling tussen de raffinaderijen en de chemiesector en meer bepaald de productie van HVC's. In beide varianten blijft de vraag naar nafta vanuit de Vlaamse chemie na 2040 onder het productieniveau van de Vlaamse raffinaderijen zakken, maar de kloof is onder beide varianten wel significant kleiner waardoor er minder nafta geëxporteerd zou moeten worden:

- Onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**) zou in 2050 nog maar 40% van de naftaproductie in Vlaanderen afgenomen worden voor de productie van HVC's. De overige 60% zou geëxporteerd kunnen/moeten worden.
- Onder variant 1 zou door de sterke inzet van nafta schokgolf reactoren in 2050 nog steeds 80% van de nafta van de Vlaamse raffinaderijen binnen de Vlaamse chemie geconsumeerd worden.
- Onder variant 2 zou door het behoud van 1/3 van de nafta stoomkrakers in 2050 nog steeds 60% van de nafta van de Vlaamse raffinaderijen binnen de Vlaamse chemie geconsumeerd worden.

Staal: Sensitiviteitsanalyse op basis van de energie- en feedstockprijzen

Voor de staalsector worden er bij de twee varianten vooral gewijzigde assumpties gehanteerd inzake de inzet van H₂ in de hoogovens:

Variant 1 – lagere elektriciteitsprijzen, hogere prijzen voor fossiele brandstoffen

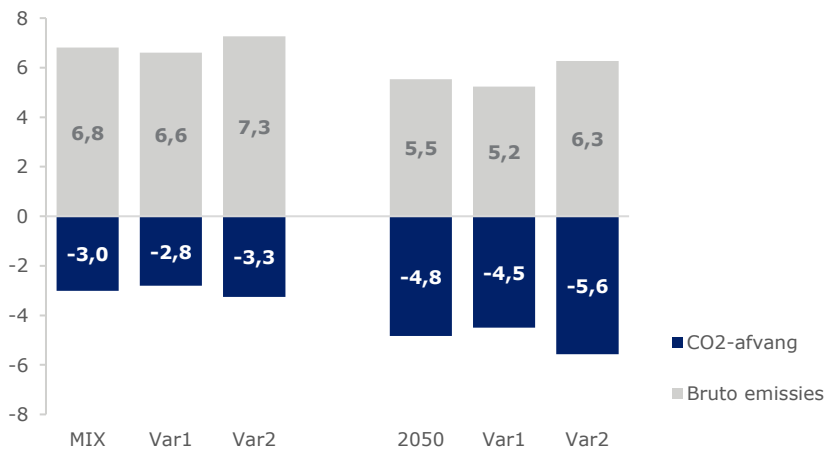
- Er wordt meer H₂ ingezet ter gedeeltelijke vervanging van steenkool (20% t.o.v. 14,5% in het centraal verkenningsscenario (**MIX**)). Ongeveer 40% hiervan wordt nog geproduceerd via methaanpyrolyse (onder de chemiesector), maar door de hoge aardgas en lage elektriciteitsprijzen wordt de meerderheid (60%) geproduceerd via elektrolyse.

Variante 2 – hoge elektriciteitsprijzen, lagere prijzen voor fossiele brandstoffen

- In dit scenario wordt er geen verschuiving verwacht van steenkool naar H₂. Hoewel de productie van H₂ via methaanpyrolyse goedkoper wordt, blijft het door lage steenkoolprijzen voordeliger om goedkoop steenkool in te zetten en de resulterende emissies af te vangen.

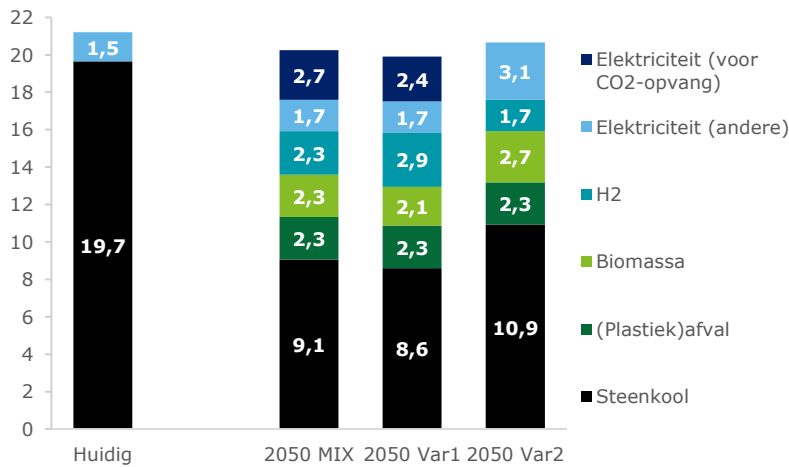
Resultaten

De finale emissies blijven gelijk tussen de drie scenario's, maar de inzet van CO₂-afvang wijzigt beperkt naarmate er meer of minder wordt ingezet op de gedeeltelijke vervanging van steenkool door H₂.



Figuur 63 Broeikasgasemissies in de staalsector en gebruik van carbon capture technologie onder het centraal verkenningsscenario (MIX) en diens varianten (in Mton).

Het energieverbruik stijgt licht onder de tweede variant door een hogere inzet van CO₂-afvang, en omdat het energieverbruik voor de H₂-productie wordt aangerekend onder de chemiesector.



Figuur 64 Evolutie van energie-inputs voor primair staal in het voorgestelde verkenningsscenario en diens twee varianten (Var1 en Var2) (in TWh).

Belangrijkste conclusies o.b.v. de 3 verkenningsscenario's

Het gehanteerde model is geen optimalisatiemodel en het kiest dus niet automatisch de meest kostenefficiënte route om tot een gewenst resultaat te komen. Het is daarentegen een simulatiemodel, waarbij het eindresultaat en de route daarnaartoe het resultaat zijn van de assumpties en keuzes die de gebruiker invoert. Zo laat het toe de impact van variërende assumpties transparant in kaart te brengen.

De onzekerheden rond o.a. timing van implementatie en de uiteindelijke keuzes in technologiemix zijn groot en nemen toe naarmate er verder in de tijd wordt gekeken. Er zal een belangrijke rol in de transitie voor het beleid zijn weggelegd, op Europees en Vlaams niveau, en deze zullen samen met de industrie, in combinatie met de opgesomde randvoorwaarden, de toekomst bepalen.

De simulaties in dit rapport dienen dan ook niet gelezen te worden als een voorspelling van de toekomst, maar als een verkenning ervan en dienen steeds met de randvoorwaarden in het achterhoofd geïnterpreteerd te worden. De 3 verkenningsscenario's laten echter toe om bepaalde conclusies te nemen en 'must haves' te bepalen die in elk transitiescenario van belang zullen:

- Er bestaat **geen 'silver bullet'** om een koolstofcirculaire en CO₂-arme Vlaamse industrie te bereiken. De transitie zal gerealiseerd worden o.b.v. een combinatie van de thema's 'biomassa', 'circulariteit', 'elektrificatie en H₂' en 'CO₂-afvang'.
- Er zijn significante emissiereducties mogelijk in de Vlaamse industrie, maar **CO₂-afvang** zal in elk toekomstscenario een belangrijke rol spelen. De nodige infrastructuur dient hierop voorbereid te worden, maar ook strategische partnerships moeten worden afgesloten met buurlanden om de opslag van CO₂ te verzekeren, naast doorbraken in het rendabel afvangen.
- De varianten tonen aan dat de **technologiemix** nog niet vaststaat en dat er verschillende mogelijkheden zijn, zeer afhankelijk van energieprijzen en innovatieve ontwikkelingen. In elk van de scenario's zal er echter **een zeer ambitieuze** uitrol nodig zijn die veel sneller dient te gebeuren dan gebruikelijk in de industrie om aan de EU doelstellingen van klimaatneutraliteit te voldoen tegen 2050.
- De verkenningsscenario's hebben aangetoond dat er nog heel wat **innovatie** nodig is om de transitie te realiseren. Een sleutelrol ligt hier bij zowel bij basisonderzoek (TRL 0-2) als de opschaling van lage TRL's om technologieën marktrijp te maken (focus op efficiëntie, yields, systeembenaderingen, etc.).
- Daarnaast zijn er reeds technologieën **technologisch** klaar, maar worden ze niet geïmplementeerd omdat ze nog niet **commercieel** klaar zijn omwille van een niet-concurrentiële business case. Er zal

vanuit Europees en Vlaams beleid een prikkel gegeven moeten worden om dit te helpen faciliteren.

- Er is nog een **belangrijk innovatievraagstuk** om nog meer significante emissiereducties te realiseren voor de **warmtegerelateerde sectoren**. Deze 'overige industrieën' zijn vaak niet gelegen in 1 van de 3 industriële clusters en zullen minder mogelijkheden hebben om aan te sluiten op een bestaand CO₂ en H₂-netwerk. Voornamelijk bij de hoge temperaturen is er nog een vraagstuk om deze bv. te elektrificeren.
- In elk van de verkenningsscenario's is er een **significante verschuiving van de huidige energie- en feedstockvraag**. Zo is er o.a. een groot potentieel in Vlaanderen om kunststofafval te valoriseren, H₂ in te zetten, en het gebruiken van biomassa. De shift van fossiele energiedragers naar klimaatneutrale kan de afhankelijkheid van CO₂-afvang wat beperken. De beschikbaarheid en de prijs van energie spelen hier ook een belangrijke rol. Alleszins moeten de logistieke ketens voor biomassa en kunststof en infrastructuur voor H₂, CO₂ en de versterking van elektriciteitsnet worden uitgebouwd. Daarbij zal er in elk van de verkenningsscenario's nood zijn aan **import** van deze feedstock en energie en o.a. de infrastructuur dient hierop voorzien te worden.
- **Circulaire** technologieën zullen onder alle mogelijke verkenningsscenario's een belangrijke rol blijven spelen, omwille van de druk vanuit materialen- en afvalbeleid en een maatschappelijke druk. Hier is er voornamelijk potentieel voor de inzet van kunststofafval voor recyclage (eerst mechanisch, dan chemisch) en ter gedeeltelijke vervanging van steenkool voor staalproductie (via IGAR-technologie);
- De afgevangen CO₂ kan ofwel gebruikt worden als feedstock (**CCU**), ofwel kan deze getransporteerd en geologisch opgeslagen worden (**CCS**). Een belangrijke piste voor de valorisatie van CO₂ is de productie van nieuwe platformmoleculen ethanol en methanol, die omgezet kunnen worden naar HVC's. Deze toepassingen vereisen evenwel de beschikbaarheid van grote hoeveelheden H₂. Transport voor CO₂-opslag (of gebruik buiten de Vlaamse industrie) blijft evenwel over alle scenario's heen belangrijk: minimum 8 Mton CO_{2eq}/jaar in 2050.
- **Elektrificatie van warmte en processen zal** een belangrijke rol spelen. In elk van de verkenningsscenario's zal de vraag naar elektriciteit sterk stijgen (van +50% tot een verdriedubbeling).
- **Waterstof:** Daarnaast is de inzet van H₂ als feedstock (of in mindere mate als brandstof bij processen die hoge temperatuur nodig hebben) ook een belangrijke piste om koolstof te valoriseren. De grote stijgende vraag naar deze producten vanuit de energie-intensieve industrieën zal voornamelijk geconcentreerd zijn in de 3 industriële clusters. O.a. de import- en transportinfrastructuur moeten hierop worden voorbereid. De mate van inzet van deze piste is evenwel ook sterk afhankelijk van de beschikbaarheid en de marktprijs van elektriciteit en technologische ontwikkelingen zoals hogere efficiëntiewinsten en opslag.
- **Biomassa** zal ook een rol spelen in de transitie. Biomassa kan in combinatie met CO₂-afvang tot negatieve emissies leiden. De mate van inzet van deze piste is evenwel sterk afhankelijk van de beschikbaarheid en de marktprijs van biomassa. De logistieke ketens moeten hierop voorbereid worden, inclusief de importmogelijkheden. De inzet van biomassa verlaagt de nood aan CO₂-afvang.

- Er zullen potentieel **nieuwe sectorkoppelingen** gerealiseerd worden, onder meer tussen chemie en staal. Er zijn verschillende varianten mogelijk en de toekomst zal uitwijzen welke keuzes er door de industrie worden genomen.

Roadmap naar 2050

Indien er wordt ingezet op een evenwichtige combinatie van de vier transitiepaden, kan er potentieel voor 86,4% aan emissies gereduceerd worden in de Vlaamse energie-intensieve sectoren, ervan uitgaand dat de momenteel beschikbare technologieën met lage TRL's implementeerbaar zijn op deze termijn en economisch rendabel worden. Dit hoofdstuk tracht een invulling te geven aan dit centraal verkenningsscenario (**MIX**) door middel van een roadmap, waarin de benodigde acties om dit te realiseren per decennium verder zijn uitgewerkt per thema en per sector.

De roadmap is geen voorspelling van de toekomst, maar slechts een mogelijke blauwdruk voor een klimaatneutrale industrie in 2050. De mate waarin dit centraal verkenningsscenario (**MIX**) effectief tot stand komt, hangt sterk af het kader dat de Vlaamse overheid creëert, van verdere technologische innovaties, de kostprijs van energiedragers en feedstock en de implementatie van de voorgestelde innovaties door de industrie. Deze filosofie ent zich op de investeringsbeslissingen van de industrie en de industrie gedreven innovaties. Deze dienen echter omkaderd te worden door de aanleg van de benodigde infrastructuur en logistieke ketens. Daarnaast is er een flankerend beleid nodig om een kader te creëren waarin de transitie uiteindelijk kan plaatsvinden, dan wel versnellen.

De roadmap is echter wel gebaseerd op de resultaten van het centraal verkenningsscenario en hun varianten waarin de transitie mogelijks kan plaatsvinden en die geënt is op het huidige Vlaamse industriële weefsel. Alhoewel de technologiemix verschillend was in deze scenario's hadden ze wel enkele belangrijke gemeenschappelijke elementen en komen verschillende technologieën aan bod. Gezien de onzekerheid van de technologiemix dient aan de verschillende belangrijk sleutel technologieën de kans gegeven te worden om zich verder te ontwikkelen, welke technologiemix of scenario het uiteindelijk zal worden zal afhangen van het verdere verloop van het innovatiepad en economische randvoorwaarden.

De onzekerheid van de roadmap wordt groter naarmate er verder in de toekomst wordt gekeken, doordat veel technologische innovaties alsook industriële implementaties zich nog moeten realiseren. De gebruikte concepten in de roadmap omvatten zeer innovatieve concepten, incl. nieuwe innovatie uit recente (i.e. 2019/2020) wetenschappelijke publicaties. Daardoor moet de industriële transitie worden opgevolgd via een industrieel transitieprogramma waarin de roadmap telkens wordt herbekeken en/of bijgestuurd in functie van nieuwe inzichten. Dit betekent dat bepaalde pistes uitgesteld of mogelijks verlaten kunnen worden, terwijl nieuwe pistes zich kunnen aandien of verder worden ontwikkeld.

Hoewel de werkelijke invulling van de roadmap in realiteit kan afwijken door nieuwe ontwikkelingen en keuzes van de industrie of wijzigingen in de vereiste randvoorwaarden, zullen de hoofdlijnen in elk van de mogelijke scenario's dezelfde zijn.

In het centraal verkenningsscenario (**MIX**) zetten we in op een combinatie van de vier thema's, waarbij:

- **Kunststofafval** meegenomen wordt vanwege de regulatoire druk vanuit de EU om in te zetten op de reductie en recyclage van

kunststof en een circulair beleid. In het centraal verkenningsscenario zou 2 Mton kunststofafval nodig zijn uit de 25 Mton beschikbare kunststofafvalstroom.

- Er voor 61,2 PJ **biomassa** nodig zal zijn voor industriële toepassingen (cfr. momenteel wordt in Vlaanderen jaarlijks een totaal van 70 PJ aan biomassa gebruikt waarvan 10 PJ voor industriële toepassingen). Er zal daarmee tegen 2050 tussen de 30 en 50 PJ extra import nodig zijn, daar er ongeveer tot 30 PJ lokaal beschikbaar zou zijn.
- De toepassing van **CCUS** sterk aan bod komt in de roadmap daar dit het principe van 'koolstofcirculair en CO₂-arm' onderstreept en dit zeker in het eerste decennium voorafgaand aan het opschalen van innovatieve technologieën een noodzakelijke voorwaarde is om vrij snel tot emissiereducties te komen.
- **Syn-brandstoffen** ook worden meegenomen omdat in bepaalde gevallen (bijv. hoge temperatuur elektrificatie of bedrijven buiten cluster zonder toegang tot CO₂-netwerk) directe elektrificatie van warmte of carbon capture niet mogelijk zal zijn.
- Door middel van **sectorale symbiose** verdere winsten behaald kunnen worden. Bijv. CO uit hoogovens hergebruiken in de chemie als feedstock.

Daar er van uitgegaan wordt dat de bulk van de onderzochte innovatieve technologieën pas industrieel toepasbaar zal zijn vanaf 2035, zal er in het komende decennium (**2020 tot en met 2035**) voornamelijk ingezet dienen te worden op emissiereducties die al kunnen worden gerealiseerd op basis van de toepassing van bestaande technologieën en met daarbij een belangrijke rol voor de toepassing van Carbon Capture and Storage (CCS) in de industriële clusters in Antwerpen (Antwerp@C) en Gent (Carbon Connect Delta).

Voor CCS en CCU is er een maatschappelijk draagvlak nodig, en zijn vergunning voor internationale transport en opslag complex (zie ook Appendix C voor randvoorwaarden omtrent CCS/CCU). Ook de timings voor de opschaling zijn ambitieus. Echter, zijn de in de roadmap aangebrachte timings conservatiever dan de aangehouden timings door Antwerp@C.

De verwachting is dat de inzet van radicale procesinnovaties en omschakelingen in de waardeketens pas vanaf 2035 zullen plaatsvinden. De **periode 2020 tot en met 2035** is evenwel een cruciale periode om zich voor te bereiden op de industriële transitie. Zowel de investeringen vanuit de bedrijven, het technologisch onderzoek en het aanreiken van flankerende beleidsmaatregelen om deze transitie te realiseren zullen cruciaal zijn. Zo is er onder meer nood aan het voorbereiden en realiseren van de nodige infrastructuur, het uitvoeren van piloot- en demoprojecten die de innovatieve technologieën toepasbaar moeten maken en de opschaling van basisonderzoek. Vele van deze technologieën zijn reeds technologisch klaar om op grote schaal geïmplementeerd te worden in de industrie maar commercieel is er vaak nog geen business case voor de bedrijven. Er is dan ook een sterke beleidsprikkel nodig en een industrieel transitiekader om de transitie te faciliteren en de implementatie van deze technologieën te bewerkstelligen.

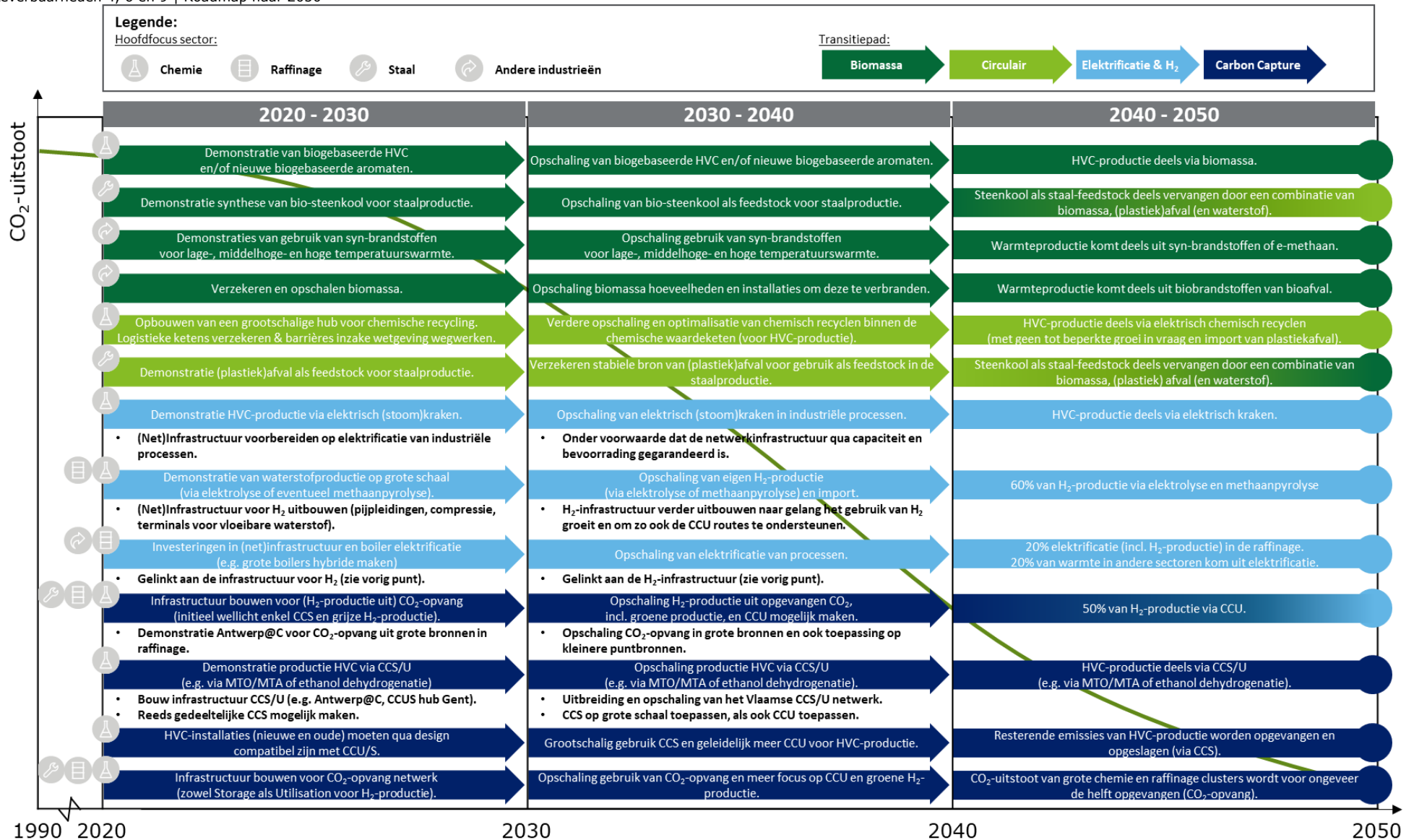
Mede gelet op de langere doorlooptijd voor de opschaling van innovaties enerzijds en het voorzien van de nodige logistiek en infrastructuur anderzijds, raden we aan om maximaal in te zetten op:

- Het voorbereiden en ontwikkelen van nieuwe technologieën die de CO₂-reductie economisch rendabel moet maken, zoals onder meer voorzien in het Moonshot initiatief.
- Efficiëntieverbetering van de huidige en nieuwe technologieën.
- Het toepassen van fuel shifts.
- Het toepassen van CCS voor hoge concentratie CO₂ (ammoniak, ethyleen oxide en SMR).
- Het realiseren van piloot- en demoprojecten van nieuwe technologieën (zoals CCUS met Antwerp@C en Carbon Connect Delta, biogebaseerde routes, elektrificatie en kunststofrecycling voor staal).
- Het realiseren van de benodigde infrastructuur voor CO₂, H₂ en elektriciteit.
- Het aanpassen van de logistieke ketens voor het inzetten van biomassa en kunststof als feedstock.

Het jaar 2035 is in het voorgestelde verkenningsscenario een kantelpunt. **Vanaf 2035** is de verwachting dat de bulk van **innovatieve technologieën** **matuur en mogelijk industrieel inzetbaar wordt**. De periode zal zich voornamelijk kenmerken door opschaling van piloot- en demoprojecten, industriële toepassing van de op dan mature technologieën en de verdere uitbouw van infrastructuur.

Het voorgestelde verkenningsscenario en de twee varianten laat zien dat er meer nood zal zijn aan elektriciteit, capaciteit en infrastructuur voor H₂, infrastructuur voor een industrieel CO₂-netwerk en CO₂-opslag, betrouwbare logistieke ketens voor kunststofafval en biomassa voor opgeschaald gebruik in de industrie en importinfrastructuur.

Strategisch basisonderzoek en innovatie kan helpen door in de eerste tien jaar te focussen op innovaties die inzetten op verbetering van de economische, materiaal- en energie-efficiëntie van veelbelovende (proces) technologieën, alsook de inzet van disruptieve innovaties (zoals in het kader van het Moonshot innovatieprogramma). Daarnaast is er een steunprogramma nodig waar piloot- en demoprojecten kunnen gerealiseerd worden voor elektrificatie, inzet van kunststof(afval), gebruik van biomassa en CO₂-afvang waarbij tevens beroep gedaan wordt op middelen van Europese investeringsprogramma's. In Vlaanderen dient een holistisch ecosysteem te ontstaan waarbij industrie, overheid en kennisinstellingen samenwerken om deze transitie mogelijk te maken en waar mogelijk te versnellen. Dit kan een kader vormen met een maximale hefboomwerking om bedrijven toe te laten om de benodigde innovaties hier in Vlaanderen te implementeren (en bijvoorbeeld niet elders).



Figuur 65 Roadmap voor een koolstofcirculaire en CO₂-arme Vlaamse industrie (onder het centraal verkenningsscenario (MIX)).

Hoofdpijnen van de roadmap

2020-2030
<p>Het eerste decennium zal zich kenmerken door het voorbereiden van de industrie op de transitie door o.a. verdere procesoptimalisaties en efficiëntieverbeteringen van de huidige en nieuwe technologieën.</p> <p>Er moet aan noodzakelijke infrastructuur worden gebouwd voor alle vier thema's.</p> <p>Er moeten piloot- en demoprojecten en waar mogelijke commerciële projecten worden uitgevoerd voor alle vier thema's.</p> <p>Er moet gekeken worden naar het aanpassen en uitbouwen van de logistieke ketens voor het inzetten van biomassa en kunststof als feedstock.</p> <p>Om grote broeikasgasreducties te realiseren in dit decennium, moet er gekeken worden naar de industriële implementatie van gekende CO₂-afvang technologieën voor hoge concentratie CO₂ (ammoniak, ethyleen oxide en SMR). Het is van groot belang dat projecten met sectorkoppeling zoals Antwerp@C zich realiseren voor de chemie- en raffinagecluster in Antwerpen, of de staal- en chemiebedrijven ArcelorMittal met DOW en Yara in de havencluster van North Sea Port (Carbon Connect Delta) (dit kadert in de initiatieven van Smart Delta Resources).</p>
2030-2040
<p>Het tweede decennium zal zich kenmerken door de opschaling van innovatie technologieën voor industriële toepassing om broeikasgasreducties te realiseren.</p> <p>De infrastructuur die in de periode 2020-2030 is opgestart en aangelegd, dient verder uitgebouwd te worden.</p> <p>Daarnaast zullen er voor elk van de vier thema's zich industriële opschalingen realiseren van piloot- en demoprojecten.</p> <p>CCS speelt nog steeds een zeer centrale rol en de bedrijven in industriële clusters zullen met moeilijker te capteren CO₂-bronnen ook op een CCUS netwerk dienen aan te sluiten (met in eerste instantie toepassingen in de staalsector en vervolgens raffinage en chemie).</p>
2040-2050
<p>Het laatste decennium zal allesbepalend zijn voor het halen van de klimaatdoelstellingen.</p> <p>In 2040-2050 is het transitiepad voor de industrie duidelijkheid geworden. De nodige infrastructuur is gebouwd en de piloot- en demoprojecten zijn reeds opgeschaald tot volwaardige industriële toepassingen.</p> <p>De industriële opschalingsgolf die vanaf 2035 is ingezet, zal verder uitrollen tot de meeste bedrijven de transitie hebben doorgemaakt en samen bijdragen tot klimaatneutraliteit.</p> <p>Een groot deel van de emissies in de Antwerpse en Gentse havenclusters zullen gecapteerd en opgeslagen worden. Verder zullen deze hergebruikt worden waar mogelijk. Een verschuiving van CCS naar CCU is nodig.</p> <p>Daarnaast moet er een grootschalige overschakeling gerealiseerd zijn naar klimaatneutrale energiedragers en dient CCS toegepast te worden op resterende fossiele emissies in grote clusters.</p>

Tabel 13 Hoofdpijnen van de roadmap (2020-2050)

Hoofdpijnen per thema

2020-2030
Biomassa
<p>In de komende tien jaar dienen er binnen de chemie demonstraties te zijn van de productie van alternatieve (biogebaseerde/aromaten) HVC's. Gegeven de significante toekomstige volumes moet de voorkeur gaan naar biomassa dat niet voor voedselproductie gebruikt kan worden. Het is belangrijk dat het onderzoek inzet op het boeken van efficiëntiewinsten zodat minder biomassa vereist is voor eenzelfde output HVC. Er is immers een beperkt aanbod en een belangrijke concurrerende vraag vanuit andere landen en sectoren.</p> <p>Daarnaast dient een evaluatie te gebeuren van het technisch en economisch potentieel van een grootschalige biogebaseerde raffinage en de link met mogelijke (bestaande of nieuwe) waardeketens.</p> <p>Voor staalproductie kunnen demonstraties aantonen hoe bio-steenkool kan worden gebruikt als alternatief voor fossiele steenkool.</p> <p>Ten slotte kan biomassa ook worden gebruikt om afvalstromen om te zetten tot energie, voornamelijk in kleinere bedrijven buiten de industriële clusters.</p> <p>In eerste instantie zal ingezet worden op gebruik van lokaal beschikbare duurzame houderige biomassa of ander biobased restafval. Hiervan is er 30 PJ beschikbaar in België (1% van het Europese totaal aan 3.000 PJ), wat voldoende is voor de vermelde demonstraties. Tegelijkertijd moet er binnen Europa gekeken worden naar het opzetten van betrouwbare logistieke ketens en het aangaan van de nodige overeenkomsten om toekomstige bevoorradingszekerheid veilig te stellen. Namelijk, door de beperkte lokale beschikbaarheid van duurzame en voor de industrie relevante biomassa zal namelijk tegen 2050 tussen de 30 – 50 PJ moeten worden geïmporteerd voor gebruik in de Vlaamse industrie. Het is belangrijk dat deze import van relatief nabij kan gebeuren (i.e. tot net over de grens) zodat het positieve effect niet teniet gedaan wordt door de indirecte emissies ten gevolge van transport. Dergelijke logistieke ketens kunnen nu reeds worden opgebouwd opdat dit later geen beperkende factor hoeft te zijn. Europa/Vlaanderen heeft als strategie om de voedingsketen meer circulair te maken d.w.z. nog meer gebruik maken van alle biomassa stromen om (dieren)voeding te maken en de hoeveelheid voedselverliezen sterk reduceren. Deze zozegde afvalstromen zullen dus normaliter niet meer beschikbaar zijn voor andere toepassingen. Om deze reden hebben we in onze scenario's er naar gestreefd om de groei in de vraag naar biomassa te beperken en in te zetten op technologieën die kunnen werken o.b.v. houtachtige biomassa.</p>
Circulair
<p>In de komende tien jaar dient de chemie in te zetten op het ontwikkelen/ aantonen van chemische recycling van kunststoffen op een middelgrote tot grote schaal. Hiervoor kan een eerste grootschalige hub voor chemisch recycling worden opgebouwd, wat een capaciteit van 10.000 tot 100.000 ton per jaar zou kunnen hebben. Hierbij dient tegelijkertijd ook ingezet te worden op het verzekeren van een stabiele toeleveringsketen van (kunststof)afval (via de uitbouw/aanpassing van logistieke ketens en het uitwerken van een ondersteunend beleidskader mogelijk te maken). Op die manier kan de basis worden gelegd voor latere grootschalige toepassing.</p> <p>Binnen de staalsector kunnen demonstraties worden uitgevoerd omtrent innovaties die het mogelijk maken om circulair gebruik te maken van chemicaliën of afval als feedstock in de staalproductie.</p>
Elektrificatie en H₂
<p>In de komende tien jaar kan binnen de chemie gekeken worden om de HVC-productie te elektrificeren via elektrisch (stoom)kraken. Hiertoe kunnen één tot twee nieuwe katalytische chemische processen worden gedemonstreerd op grote schaal die een significant lagere CO₂-emissie en energiebehoefte hebben en mogelijkheid bieden tot elektrificatie. De capaciteit van dergelijke grote schaal demonstraties kan tussen de 10.000 tot 100.000 ton HVC per jaar zijn.</p>

Vervolgens kunnen installaties en demonstraties plaatsvinden om **H₂** op grotere schaal te produceren. Installaties dienen te worden uitgebreid voor grotere productie van H₂, alsook de vervanging van grijze H₂ (via SMR) door blauwe H₂ (koppeling SMR met CO₂-afvang) mogelijk te maken. Verdere demonstraties dienen al te kijken naar de groene H₂, via elektrolyse, of turquoise H₂, via methaanpyrolyse, zodat deze later kunnen worden opgeschaald onder technisch- en economisch haalbare omstandigheden.

Ook dient er ingezet te worden op het **elektrificeren van boilers** voor lage temperatuurwarmte. Daar kan bijkomend worden gekeken naar hybride systemen zodat later de elektrificatie van boilers op een grotere schaal kan plaatsvinden. Daarnaast kunnen ook demonstraties worden gestart voor de elektrificatie van hoge temperatuurwarmte.

De elektrificatie van de bovengenoemde processen heeft ook implicaties op de **netinfrastructuur**. Een versterking van het net, vereist bijkomende investeringen. Voor grootschalige toepassing zijn ook bijkomende investeringen nodig zoals bijv. pijpleidingen, compressie units en terminals voor (vloeibare) H₂, alsook een infrastructuur die de hogere mate van elektrificatie van de industrie aankan (grotere volumes en schommelingen).

CCS/CCU

Het eerste decennium zal voornamelijk inzetten op de demonstraties van CO₂-afvang toepassingen. Dit is voornamelijk in het begin CCS, maar zal na demonstraties ook geleidelijk gaan kijken naar de opschaling van CCU.

Indien het realiseren van Antwerp@C slaagt, kan een demonstratie plaatsvinden van CO₂-afvang uit grote bronnen met hoge CO₂ concentratie zoals ethyleen-oxide-, ammoniak- of H₂-productie. Op deze manier kan ongeveer 2.5 Mton CO₂ worden verminderd.

Daarnaast kan een blauw H₂-project gelinkt worden aan een CCS-netwerk (zoals bovenstaande voorbeeld van Antwerp@C). De mogelijkheden hierbij zijn een grote installatie voor H₂-productie met CCS, of via kleinere, gedecentraliseerde installaties voor H₂-productie met CCS. Ongeacht het gekozen pad, kan de bestaande SMR-technologie worden gecombineerd met CCS om een nieuw type blauwe H₂ te produceren.

Naast de opvang van CO₂ uit grote bronnen, kunnen ook initiële experimenten worden gedaan om onderzoek naar CO₂-afvang bij bronnen met een lage CO₂ concentratie (vb. Onder 10% verbrandingsgassen) uit te voeren.

In de **chemie** kunnen demonstraties plaatsvinden om CCU in te zetten voor de productie in de chemie of voor elektrische brandstofproductie (1.000 tot 10.000 ton per jaar). Daarvoor zouden ook HVC-installaties (zowel oude als nieuwe) qua design wel compatibel moeten zijn met CCUS.

In de **staal** kunnen demonstraties zijn van CCU in de staalproductie voor ethanol en chemicaliën (10.000 ton per jaar).

Tabel 14 Hoofdlijnen per thema (2020-2030)

2030-2040

Biomassa

Het tweede decennium kan de **chemie** gebruiken om, indien technisch en economisch haalbaar, een grootschalige lignine-tot-BTX (benzeen, toluen, en xyleen)-fabriek op te zetten. Met de eerdere demonstraties van biomassa-toepassingen zou een dergelijke fabriek dan reeds producties moeten verwezenlijken tot 100 kton BTX per jaar. Daarnaast zou, indien technisch en economisch haalbaar, 5 tot 10% van de chemische feedstock (bijv. ethanol) (tot 300 kton per jaar) uit biomassa moeten worden gesynthetiseerd.

Binnen de **raffinage** kan heroriëntatie plaatsvinden van biobrandstoffen naar lucht- en scheepvaart.

Ten slotte dient volledig gebruik gemaakt te worden van afvalstromen als energievoorziening in de kleinere bedrijven buiten industriële clusters voor zover dit mogelijk is.

In deze fase zal de toevoer van biomassa vanuit Europa, met name voor gebruik in de chemie, opgeschaald moeten worden. Om de indirecte emissies gelinkt aan het transport enigszins te beperken, kan dit gebeuren per trein of binnenlandse scheepvaart.

Circulair

Via de initiële hub omtrent **chemisch recycling** kan de verdere capaciteit worden vergroot om zo tot 1 Mton kunststoffen te recyclen (waar ongeveer 80% kan worden gebruikt als feedstock of als monomeren voor polymeren). De toeleveringsketen omtrent dit kunststofafval dient verder geoptimaliseerd te worden om opschaling toe te laten.

Het circulair gebruik van kunststoffen of afval als feedstock in de **staalsector** dient verder te worden bevorderd. Dit zal ook vereisen dat er een betrouwbare, stabiele toelevering is van (kunststof)afval hiervoor.

Elektrificatie en H₂

In het tweede decennium is er opportuniteit voor de **chemie** om het gebruik van **elektrisch stoomkraken** op grote schaal te vergroten naar 100.000 tot 500.000 ton HVC per jaar. Zo kan tot 10% van de HVC-productie op die alternatieve manier worden geproduceerd. Indien de demonstratie van één tot twee nieuwe katalytisch chemische processen met significant lagere CO₂ en energieverbruik succesvol is, dan kunnen deze op industriële schaal worden toegepast en worden geëlektrificeerd.

De **eigen H₂-productie** (groene of turquoise) kan verder worden opgeschroefd. Indien het gebruik van H₂ in de industrie harder toeneemt dan de eigen productie kan ook voor additionele import van H₂ worden gekozen. Verdere investeringen in H₂ en daarmee de netinfrastructuur zijn nodig, ook omdat in parallel wordt verwacht dat de nood aan H₂ verder zal groeien om in de CO₂-afvang toepassingen (volgende transitiepad) te voorzien.

Kleine boilers (minder dan 1 MW) kunnen volledig worden geëlektrificeerd. Bijkomend kan worden ingezet op de demonstratie van de elektrificatie van hoge temperatuurwarmte in een geïntegreerd productieproces buiten industriële clusters. Denk hierbij aan de toepassing in glas of keramiek. De opschaling van elektrificatie van warmte en processen zal ook om verdere investeringen in de netinfrastructuur vragen om aan de capaciteit en bevoorrading te voldoen.

CCS/CCU

Verder bouwend op de infrastructurele en demonstratieve applicaties van CC(S), kan in het tweede decennium verder het potentieel van **CCU in de staalsector** worden gemaximaliseerd. Dit zal voornamelijk in de staalproductie gebruik maken van de afvalgassen en om hiermee e-brandstoffen of platform chemicaliën (zoals ethanol en methanol) te produceren (tot 3 Mton).

CO₂-afvang kan reeds ingezet worden om de overige CO₂-emissies van de staalproductie verder op te vangen. Bijkomend kunnen er transportinfrastructuren worden opgezet voor de verscheping of vervoer via pijpleidingen naar Antwerpen, Zeebrugge of Terneuzen in Nederland.

Indien economisch rendabel, kan binnen de chemie de HVC-productie via CCS/U opgeschaald worden. Daarmee dient geïnvesteerd te worden in e-brandstoffen (ethanol/methanol) voor de olefinenproductie of ethanol dehydrogenatie (1 Mton per jaar, gelijk aan 25% van totale olefinen productie). E-brandstoffen kunnen uit de bovenbeschreven routes uit de staal komen. Dit is afhankelijk van hoe de markt en de wetgeving dit zal toelaten, alsook de hoeveelheid en prijs van het H₂-aanbod.

Indien CO₂-netwerken operationeel zijn en de opslag is verzekerd, kan de blauwe H₂-productie verder worden opgeschaald om CCU mogelijk te maken. Dit is afhankelijk van de marktomstandigheden voor H₂. Er wordt verondersteld dat er geen grote import van H₂ met lage kosten mogelijk is, zie Appendix C.

Tabel 15 Hoofdpijnen per thema (2030-2040).

2040-2050

Biomassa

Tegen 2050 is er een opportuniteit om in de **chemie** 15% van alle HVC-productie uit MTO/MTA, (bio)ethaan dehydrogenatie en biomassa te halen.

Voor de **staalproductie** zal biomassa voor verdere opschaling zorgen van de synthese van bio-steenkool als (gedeeltelijke) vervanger van reguliere steenkool. Uiteindelijk zou dan 50% van de steenkool voor de staalproductie vervangen kunnen worden (echter is dit niet puur toe te schrijven aan bio-steenkool. Hier heeft ook de circulaire toepassing van kunststofafval een rol te spelen, alsook het gebruik van H₂).

Naast het gebruik van lokaal beschikbare biomassa, staat de aanvoer van biomassa nu op punt. De verwachte **import** van biomassa betreft minstens 150 kton (overeenkomstig 30 PJ), oftewel de helft van de totale huidige vraag aan biomassa. Merk op dat de indirecte emissies gelinkt aan transport snel kunnen oplopen. Als de biomassa van gemiddeld 500 km afstand aangevoerd wordt per trein, komt dit overeen met emissies van meer dan 2 Mton CO₂ per jaar. De duurzame import is dus enkel zinvol voor nabije biomassa en als het transport zelf zuiniger/klimaatneutraal wordt.

Circulair

In de **chemie** gaan we ervan uit dat er tegen 2050 30% van alle HVC's via elektrisch chemisch recycelen moeten komen. Via het grootschalig gebruik van chemisch recycelen van kunststoffen kan Vlaanderen zich positioneren als één van Europa's voornaamste hub hieromtrent. De capaciteit aan verwerkte kunststoffen via chemical recycling zal tussen de 1-2 Mton bedragen.

Daarnaast zal in de **staalsector** uiteindelijk 40% van het steenkoolgebruik voor de staalproductie moeten worden verminderd. Dit kan onder andere komen door de inzet van kunststofafval, die via IGAR technologie kan omgezet worden in een syngas dat de input van steenkool in hoogovens deels kan vervangen (naast de rol die bio-steenkool en H₂ kunnen spelen).

Elektrificatie en H₂

Tegen 2050 kan de **chemie** inzetten op 20% HVC-productie via de alternatieve route van elektrisch kraken. Alle nafta/ethaan kraken en propaan dehydrogenatie wordt hiervoor geëlektrificeerd (op voorwaarde dat deze energie efficiënt zijn en dat de elektrische processen voldoende matuur zijn). Er wordt verondersteld dat in 2050 alle bestaande installaties worden vervangen door nieuwe chemische processen met een laag energieverbruik en CO₂-uitstoot.

De totale H₂-productie in 2050 dient voor 50% uit elektrolyse en methaanpyrolyse te komen.

Het gebruik van deze groene en turquoise H₂ zal er daarnaast voor zorgen dat H₂ ook in de staalproductie wordt gebruikt om, samen met biomassa en (kunststof)afval 50% van de steenkool te vervangen.

In de **raffinage** zal er tegen 2050 20% worden geëlektrificeerd (incl. H₂-productie).

De totale warmte in **andere sectoren** wordt voor 20% geëlektrificeerd.

CCS/CCU

Tegen 2050 dient de toepassing van CO₂-afvang wijdverspreid te worden gebruikt.

50% van de totale Vlaamse **H₂-productie** kan daarmee via CCU worden verzekerd.

Voor de **chemie**, zal rond de 15% van de HVC-productie kunnen gebeuren met CCS/U (via de MTO/MTA of ethanol dehydrogenatie). Daarnaast kunnen de resterende emissies (20%) van HVC worden opgevangen (CCS).

De resterende CO₂-emissies van de chemie zullen worden opgevangen.

Voor de **raffinage** wordt 80% van resterende CO₂-uitstoot opgevangen (incl. H₂-productie).

Bij de **staal** wordt ook 80% van de CO₂-uitstoot opgevangen. Van deze 80% wordt vervolgens 70% hergebruikt (CCU) in de HVC-productie in de chemie. De overige 30% wordt opgeslagen (CCS) via de investeringen in de infrastructuur.

Tabel 16 Hoofdpijnen per thema (2040-2050)

Het voorgestelde verkenningsscenario en bijbehorende roadmap per decennium en per thematonen aan dat de volgende sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen bestaan voor de drie sectoren in de hoofdfocus:

Sterktes

- **Chemie:** waardeketens blijven behouden en bouwen op nieuwe platformmoleculen die via verschillende routes aangeleverd kunnen worden en zo robuustheid bevorderen. Geen afhankelijkheid van een enkele energiedrager of feedstock.
- **Raffinage:** laatste 'must-run' raffinage in EU in Vlaanderen en blijvende (maar beperktere) link met petrochemie.
- **Staal:** sectorkoppeling met chemie en afvalverwerking op basis van bestaande BF-BOF-route.
- **Overige industrieën:** Focus op fuel switches o.a. gebruik synthetische brandstoffen afkomstig uit vb. chemie of staal.

Zwaktes

- **Chemie:** investeringen in verschillende technologieën op middelgrote schaal kunnen schaalvoordelen t.o.v. beperkte grote investeringen tenietdoen. Onduidelijk welke technologieën effectief gekozen zullen worden omwille van economische redenen (bv. energieprijis, investeringskost, ontwikkelingen/beleid buiten EU) en verdere technologische ontwikkelingen.
- **Raffinage:** het behoud van bestaande businessmodellen (met hogere kosten door CO₂-mitigatie) terwijl vraagzijde (e.g. transport) transitie doormaakt.
- **Staal:** behouden van BF-BOF-route met economische afhankelijkheid van andere sectoren door sectorkoppeling.
- **Overige industrieën:** : Beperkte mogelijkheid tot CO₂-afvang of gebruik H₂ wegens ligging buiten grote industriële clusters van vele bedrijven.

Kansen

- **Chemie:** realisatie van circulaire koolstof door grootschalige verwerking van end of life kunststof naar basis- en fijnchemie. Vlaamse chemie wordt Europese hub voor circulaire economie. Mogelijkheid tot verdere proces integratie (e.g. gebruik restwarmte voor carbon capture).
- **Raffinage:** aanpassing van bestaande raffinageprocessen voor grootschalige productie van e-fuels.
- **Staal:** sectorkoppeling met andere sectoren zoals landbouw en voeding (e.g. omzetten CO/CO₂ naar proteïnen).
- **Overige industrieën:** symbiose met tertiaire sector voor gebruik restwarmte.

Bedreigingen

- **Chemie:** goedkopere energie en feedstock buiten Vlaanderen/Europa, en lagere kosten klimaatbeleid buiten Europa, kan voor structureel competitief nadeel zorgen tijdens transitie en keuze voor sommige veelbelovende klimaatvriendelijke routes bemoedigen of het risico op carbon leakage verhogen.
- **Raffinage:** snellere decarbonisatie van transport en gebouwen, snellere daling van de vraag naar nafta kan leiden tot stranded assets in Vlaanderen.
- **Staal:** goedkope H₂ kan alternatieve staal technologie met DRI+H₂ competitiever maken na 2035. BF-BOF kan een 'stranded asset' worden.
- **Overige industrieën:** beschikbaarheid en betaalbaarheid van fuel switches en beperkte R&D in klimaatvriendelijke technologieën voor kleinere sectoren.

Tabel 17 SWOT-analyse van de drie hoofdsectoren en overige industrieën binnen de roadmapstudie op basis van het voorgestelde verkenningsscenario.

Appendix Opgenomen technologieën

A:

In het model zijn 48 technologieën verwerkt voor de klimaattransitie in de Vlaamse industrieën (zie ook Leverbaarheid 2):

#	Product	Technologie	Uitleg
1.	Chemie	-HVC-bio-integrated	Een conceptuele bio-raffinaderij op basis van houtgerige biomassa. Uit de cellulose wordt melkzuur (ethyleen-equivalent) geproduceerd, en uit lignine wordt fenol en propyleen geproduceerd. Dit concept geeft hoog rendement van koolstof in biomassa naar chemische producten maar zit op lage TRL 2-4.
2.	Chemie	-HVC-catalytic-reforming	Een katalytisch kraak-proces dat plasticafval direct kan omzetten naar HVC (e.g. ethyleen, propyleen) met rendement tot 60% HVC/ton plastic. Dit proces zou energetisch een stuk efficiënter moeten zijn dan klassieke nafta of ethaan stoomkraken. TRL is nog laag op dit moment (2-4).
3.	Chemie	-HVC-ethane-cracker-steam	HVC-productie via een ethaan stoomkraker. Ethaan stoomkrakers hebben een lagere CO ₂ intensiteit vergeleken met reguliere nafta stoomkrakers wegens een hoger aandeel H ₂ , dat als bijproduct ontstaat, maar welke hergebruikt wordt in de ovens. Dit is een mature technologie (TRL 9).
4.	Chemie	-HVC-ethane-oxy-n-chemloop	HVC-productie (voornamelijk ethyleen) met ethaan als feedstock. In de oxidatieve dehydrogenatie (ODH) route wordt ethaan selectief geoxideerd tot ethyleen en water. Het wegnemen van H ₂ in de dehydrogenatie vorm van water duwt het systeem tot omzettingen op hogere equilibrium. Momenteel wordt geschat dat deze technologie op TRL 3-4 staat. Als alternatief van de ODH-route (dewelke puur gasvormig zuurstof nodig heeft) kan de katalyst met zuurstof worden gecombineerd in een metaal-oxidemengsel (MeOx). Het zuurstofoverdrachtmiddel voorziet van katalytisch zuurstof om ethaan tot ethyleen te oxideren. Hier komt enkel water bij vrij als bijproduct. Het zuurstofoverdrachtmiddel reageert vervolgens met zuurstof (regeneratie) in een luchtstroom, waar tegelijkertijd warmte vrijkomt in het reductieproces. Door een luchtscheidingseenheid te vermijden, zijn deze reactoren netto-exporteurs van energie in tegenstelling tot de energie-intensieve conventionele processen. Deze technologie wordt ook op TRL 3-4 geschat.
5.	Chemie	-HVC-ethanol-dehydration	HVC-productie uit ethanol (uit biomassa of via CCU). Dit is een alternatieve route van ethyleen productie. Via zure katalyse en op temperaturen tussen 180-500°C. Geproduceerde ethyleen kan vervolgens ook in propyleen worden omgezet via oligomerisatiekraken. Om de CO ₂ -voetafdruk verder te doen dalen kan ethanol via twee routes worden gemaakt: (i) via biomassa; of (ii) via afvalgassen uit de staalproductie en fermentatie. De technologie wordt reeds op commerciële schaal toegepast (TRL 9).

6. Chemie	-HVC-methanol-to-Aromatics	HVC-productie via methanol naar aromaten (MTA) (waarbij lage CO ₂ emissie methanol wordt gebruikt). Methanol wordt omgezet op temperaturen van 370–540°C tot een verscheidenheid aan aromaten via een op zeoliet katalystor. De TRL zit op 7-8.
		Indien methanol wordt geproduceerd via groene H ₂ en opgevangen CO ₂ van andere processen kan deze technologie bijdragen aan negatieve CO ₂ -emissies.
		Naast de synthese van methanol via H ₂ en CO ₂ , zijn er ook andere mogelijkheden voor lage CO ₂ methanol: (i) via aardgas-gebaseerde syngasproductie met CCS; (ii) via afvalgassen uit de staal (in combinatie met H ₂ , CO en CO ₂); (iii) syngas uit biomassa; en (iv) syngas uit gemeentelijk afval en post-consument kunststofafval.
7. Chemie	-HVC-methanol-to-Olefins	HVC-productie via methanol naar olefines zoals ethyleen of propyleen (MTO) (waarbij lage CO ₂ emissie methanol wordt gebruikt). Gelijkaardig proces als MTA met ander type katalysator en andere energievraag. De TRL zit op 9.
8. Chemie	-HVC-naphta-cracker-Shockwave	HVC-productie via een elektrische nafta cracker (shockwave reactor). In dit proces wordt nafta in een turbine versneld tot supersonische snelheden, en vervolgens vertraagd tot subsonische snelheden via een tegengesteld draaiende turbine. Via de super subsonische schokgolf wordt warmte regenerereerd. Momenteel wordt geschat dat deze technologie op TRL 3-5 staat. Elektrificatie van een nafta stoomkraker zou de meeste uitstoot kunnen weghalen (-90%) alsook een lager energieverbruik hebben en mogelijk een hogere opbrengst aan HVC's opleveren (per ton nafta) ten opzichte van de huidige nafta stoomkrakers.
9. Chemie	-HVC-naphta-cracker-Steam	Bestaande HVC-productie via een nafta stoomkraker (met elektriciteit, nafta en propaan als inputs). TRL is 9.
10. Chemie	-HVC-oxydative-coupling-methane	HVC-productie met methaan als input. Hier wordt methaan b.v. via een plasma gedreven proces omgezet tot ethyleen (via oxidatieve koppeling). Emissies liggen ten minste 50% lager dan bij nafta stoomkraken. Momenteel wordt geschat dat deze technologie op TRL 4 staat. Deze technologie kan gelinkt worden aan een elektrische naftakraker waarbij de vrijgekomen methaan niet meer verbrand wordt maar via OCM naar (meer) HVC's wordt omgezet.
11. Chemie	-HVC-plastic-waste-chemolysis	HVC-productie via chemolyse van bepaalde types kunststofafval (e.g. PET). De polymeren worden via chemolyse afgebroken in monomeren (e.g. ethyleenglycol en terephthaliczuur voor PET). Chemolyse kan worden gebruikt voor PET, PU, PS, polycarbonaten en polyamiden (nylon). Voor andere polymeren die niet te recyclen zijn via chemolyse, zoals e.g. polyethyleen, polypropyleen en PVC, kunnen andere processen worden gebruikt zoals pyrolyse, katalytisch kraken of vergassing. De monomeren kunnen daarna weer gebruikt worden voor de productie van polymeren (plastic). TRL staat op 9 voor PET chemolyse.
12. Chemie	-HVC-propane-dehydrogenation	HVC-productie (voornamelijk propyleen) uit elektriciteit en propaan. De dehydrogenatie van propaan is een alternatieve route voor de productie van propyleen via nafta stoomkraken. Het proces wordt wereldwijd op grote schaal toegepast. (TRL 9). Emissies zijn beperkt ten opzichte van nafta stoomkraken omwille van het gebruik van waterstof dat vrijkomt bij de dehydrogenatie van propaan.
13. Chemie	-Ammonia-HaberBosch	Ammoniakproductie uit methaan en stikstof. Via het Haber-Bosch proces wordt ammoniak geproduceerd door H ₂ en stikstof (uit de lucht) te laten binden onder hoge temperaturen en druk, met behulp van metalen katalysatoren. De gebruikte waterstof is afkomstig uit het steam methane reforming proces. TRL is 9.
14. Chemie	-Ammonia-LowCO2	Ammoniakproductie uit (CO ₂ -arme) H ₂ en stikstof. Het merendeel van de CO ₂ -emissies in de ammoniakproductie komt voort uit de productie van H ₂ via stoom methaanreforming. Om dit proces koolstofarm te maken kan: (i) stoom methaan reforming worden gecombineerd met CCS; of (ii) elektrolyse worden gebruikt voor de H ₂ -productie. TRL wordt ingeschat op 6-7.

15. Chemie	-chlorine-tech	Chloorproductie via een elektrochemisch proces met zouten. TRL is 9.
16. Chemie	-other-heat-based	Productie van andere chemicaliën (vaak afgeleid van HVCs, chloor en of ammoniak) op middelhoge temperatuur. TRL is 9.
17. Chemie	-H ₂ -SMR – Steam Methane Reforming	Methaan stoom reforming is de meest gebruikte route om H ₂ (en alternatief syngas) te produceren uit methaan. Het overschot aan geproduceerde warmte hierbij kan hergebruikt worden in andere processen. TRL is 9.
18. Chemie	-H ₂ -electrolysis	H ₂ -productie uit elektriciteit en water via elektrolyse. Er zijn verscheidene technieken om H ₂ te produceren uit elektriciteit: alkaline elektrolyse (TRL 9); Proton Exchange Membrane (PEM) (TRL 8-9) elektrolyser; Solide Oxide Electrolyse Cel (SOEC) op hoge temperaturen (TRL 7-8); foto katalytische/foto-elektrolytische H ₂ -productie (TRL 3-5).
19. Chemie	-H ₂ -methane- pyrolysis	H ₂ - en koolstofproductie uit methaan op hogere temperatuur. Dit proces kan via warmte uit elektriciteit aangedreven worden. Methaan (en andere lage koolwaterstoffen) kunnen ontbonden worden via hoge temperatuur pyrolyse. Hier komt H ₂ en vaste koolstof vrij zonder CO ₂ -emissies. De pyrolyse van methaan is een endothermisch proces en vereist daarmee warmte (300–1000°C). TRL 3-4.
20. Chemie	-CO-dry- methane- reforming	H ₂ - en syngasproductie uit methaan en CO ₂ . Syngas kan gebruikt worden voor methanol en MTO-route. Via droog methaan reforming wordt methaan (CH ₄) en CO ₂ omgezet tot syngas (H ₂ en CO). Dit is een interessant transitiepad voor het gebruiken van CO ₂ en de syngasproductie voor gebruik in de methanolproductie. TRL 4-6.
21. Chemie	-CO-plastic- gassification	Syngasproductie uit vaste biomassa en of (kunststof)afval. Kunststof (of organisch afval) wordt via partiele oxidatie omgezet tot een gasvormig mengsel van CO ₂ , CO, water, methaan en andere lichte koolwaterstoffen. TRL 9. Het oxidatiemiddel hierbij is dikwijls een mengsel van stoom en pure zuurstof of lucht. De syngas die geproduceerd wordt kan later gebruikt worden in de MTO- en MTA-routes voor het opbouwen van polymeren.
22. Chemie	-ethanol-import	Dit is een 'dummy' technologie waarbij 2de generatie bio-ethanol wordt geïmporteerd als feedstock voor HVC-productie via ethanol dehydratie (indien vraag vanuit ethanol dehydratie groter is dan de binnenlandse productie van bio-ethanol, wordt het verschil opgevuld met de 'import' technologie).
23. Chemie	-ethanol-bio- second-gen	Er zijn twee routes voor de productie van bio-ethanol: (i) via suikers of zetmeelrijke biomassa (e.g. suikerbieten, mais of suikerriet); of (ii) lignocellulose (e.g. hout of stro). Ethanol kan worden gebruikt als biobrandstof of als feedstock voor ethyleen via dehydratie. De route die hier gebruikt wordt is deze die lignocellulose als input gebruikt om zo niet te concurreren met gewassen voor voedselproductie. TRL voor ethanol via suikers is 9, TRL voor ethanol via lignocellulose 7.
24. Chemie	-ethanol- Steeelanol	Tijdens staalproductie komen er gassen zoals CO, CO ₂ en H ₂ vrij uit de hoogovens. Steeelanol produceert, via gasfermentatie met acetogenische microben, vloeibare koolwaterstoffen (zoals ethanol) uit de CO, CO ₂ en H ₂ . Momenteel wordt geschat dat deze technologie op TRL 5-7 staat maar binnen enkele jaren na demonstratie (e.g. Arcelormittal) op TRL 8 komt.
25. Chemie	-methanol- CO&H ₂ (syngas hiervoor kunnen in het model via verschillende routes aangeleverd worden, waaronder Steam route)	Methanolproductie via de synthese van syngas (mengeling van CO en H ₂). De vereiste CO en H ₂ (syngas) kunnen in het model via verschillende routes aangeleverd worden, waaronder Steam Methane Reforming, elektrolyse en methaanpyrolyse (voor wat betreft H ₂), en recuperatie van CO uit hoogovengassen, Dry Methane Reforming of de gassificatie van kunststofafval (voor wat betreft CO). Dit is de gangbare technologie om methanol te produceren (TRL 9).

26. Chemie	-methanol-CO ₂ &H ₂ (CCU route)	Dit proces is gelijkaardig aan de klassieke methanolproductie maar met input van CO ₂ (in plaats van CO) en waterstof. Het proces maakt gebruik van CO ₂ vrije waterstofproductie. De methanol kan vervolgens ingezet worden in de MTO/MTA processen voor productie van HVCs. Deze technologie werd recent op grotere schaal toegepast (TRL 8-9).
27. Chemie	-methanol_bio-route	In de bio-methanol route wordt via de gasificatie van biomassa, syngas bekomen. Dit syngas wordt vervolgens via gekende methanol-synthese omgezet naar methanol (TRL 9).
28. Raffinage	-fuels-refinery-tech	Productie van geraffineerde brandstoffen, nafta en LPG uit ruwe olie in raffinaderijen. Tijdens het proces wordt ook elektriciteit, aardgas en H ₂ verbruikt (TRL 9).
29. Raffinage	-nafta-import	Dit is een 'dummy' technologie waarbij nafta wordt geïmporteerd als feedstock voor HVC-productie via nafta stoom kraken of de nafta schokgolf reactor. Indien de vraag vanuit deze technologieën groter is dan de binnenlandse productie van nafta in de raffinaderijen, wordt het verschil opgevuld met de 'import' technologie. Indien de productie van nafta in de raffinaderijen hoger is dan de vraag vanuit HVC-productie, zal de 'nafta-import' technologie negatieve waarden produceren, wat wijst op export van overschotten uit de raffinaderijen (TRL 9).
30. Raffinage	-naphta-waste-pyrolysis	Naftaproductie uit kunststofafval, via pyrolyse en nabehandeling (TRL 4-9).
31. Staal	-BF-BOF – Blast Furnace Basic Oxygen Furnace	De huidige methode (naast EAF, zie nr. 34) om staal te produceren via ijzererts, en steenkool en cokes in een hoogoven en vervolgens een 'blast oxygen furnace' (TRL 9).
32. Staal	-BF-IGAR – Blast Furnace Injection de Gaz Réformé	Opvang van de uitgestoten CO ₂ (uit de hoogovens) en via plasma gasificatie omzetting in een syngas (met kunststofafval als bijkomende input) dat opnieuw in de hoogovens gebruikt kan worden voor ijzererts reductie. Hierdoor wordt minder steenkool/cokes gebruikt (TRL 5-8).
33. Staal	-H ₂ -DRI – Waterstof Direct Reduced Iron	Directe reductie van ijzererts via H ₂ (afkomstig uit electrolyseproces met gebruik van CO ₂ arme elektriciteit)(TRL 5-8).
34. Staal	-EAF – Electric Arc Furnace	Productie van vloeibaar staal uit voornamelijk schroot, met behulp van elektriciteit (TRL 9).
35. Gasvormige brandstoffen	-fuel-bio-fermentation	Biomethaan productie met hoge yield uit natte biomassa via een integratie van stoomdrogen, stoomelectrolyse en gassificatie (TRL 3-4). Klassieke biofermentatie naar methaan (met lagere yield) staat op TRL 9.
36. Warmte	-low-boiler-fuel	Gebruik van gasvormige/CH ₄ brandstoffen als input voor de productie van lage temperatuurwarmte (<200°C) (TRL 9).
37. Warmte	-low-boiler-electricity	Gebruik van elektriciteit voor de productie van lage temperatuurwarmte (<200°C); e.g. elektrische boilers, thermische regeneratieve batterijen en chemische hitte pompen. TRL 9 voor warmte via weerstand, voor andere technologieën is TRL meestal lager.
38. Warmte	-medium-boiler-fuel	Gebruik van gasvormige/CH ₄ brandstoffen als input voor de productie van de middelhoge temperatuurwarmte (200°C-400°C) (TRL 9).

39. Warmte	-medium-boiler-electricity	Gebruik van elektriciteit voor de productie van middelhoge temperatuurwarmte (200°C-400°C). TRL 9 voor warmte via weerstand, voor andere technologieën is TRL meestal lager.
40. Warmte	-high-boiler-fuel	Gebruik van vaste, vloeibare en gasvormige/CH ₄ brandstoffen als input voor de productie van hoge temperatuurwarmte (>400°C) (TRL 9).
41. Warmte	-high-boiler-electricity	Gebruik van elektriciteit voor de productie van hoge temperatuurwarmte (> 400°C). Deze technologie zit voor hoge temperaturen nog op lage TRL 3-4.
42. Voeding	-Tech	Gebruik van lage temperatuurwarmte en elektriciteit in voedselproductie.
43. Papier	-Primary	De productie van primair papier ('virgin paper') op basis van biomassa (bomen).
44. Papier	-Secondary	De productie van secundair/gerecycled papier op basis van papierafval.
45. Non-ferro	-Tech	Gebruik van hoge temperatuurwarmte en elektriciteit voor de non-ferroproductie.
46. Glas	-Tech	Gebruik van hoge temperatuurwarmte en elektriciteit voor de glasproductie.
47. Keramiek	-Tech	Gebruik van hoge temperatuurwarmte en elektriciteit voor de keramiekproductie.
48. Gasvormige brandstoffen	-E-methane	Synthetisch methaan wordt hier via de Sabatier reactie geproduceerd door waterstof en CO ₂ te laten reageren tot methaan en water(TRL 3-4).

Tabel 18 Gebruikte technologieën in het model.

Appendix B: Technologische assumpties in centraal verkenningsscenario (MIX)

Voor het identificeren van klimaatvriendelijke technologieën en het bepalen van de te modelleren assumpties werden volgende elementen mee in overweging genomen:

- Het verwachte CO₂ reductiepotentieel, met waar mogelijk voorkeur voor technologieën die ook energie-efficiëntie verhogen en/of een hogere product yield hebben.
- De mogelijkheid om op te schalen tot hoge productievolumes (vb. boven 100,000 t/a)
- De huidige TRL van de technologie met oog op mogelijkheid tot bereiken van TRL 9 tegen ±2035. Voor technologieën met een hogere huidige TRL (vb. 6-7) wordt uitgegaan van grotere steun voor opzetten van piloot en demo projecten binnen de EU in komende jaren (vb. EU ETS innovatiefonds) waardoor versnelling naar TRL 8-9 kan optreden.
- Er worden ook enkele technologieën met lagere TRL (vb. 3-4) meegenomen omdat deze een groot potentieel naar CO₂ reductie aangeven, belangrijk zijn voor circulaire economie en/of omdat zij aangestipt zijn als belangrijke opties door bedrijfsgedreven R&D consortia. Deze opties zullen hoogstwaarschijnlijk niet voor ±2035 ingezet kunnen worden op grote schaal.

In een tweede stap werd de volledige lijst van technologieën geprioriteerd aan de hand van expertbeoordeling en de fit met de Vlaamse industrie. Op basis hiervan werden ook de te modelleren assumpties bepaald.

De volgende principes werden hierbij toegepast:

- Hanteren van een koolstofcirculaire en CO₂-arme benadering waarbij maximaal wordt gestreefd naar valorisatie van koolstof door deze terug in te brengen in de waardeketen en emissies in de atmosfeer te vermijden.
- Hanteren van een technologiemix die gebaseerd is op het principe van technologieneutraliteit. Hierdoor wordt geen enkel thema bij voorbaat uitgesloten. Deze technologiemix moet gezien worden als een zich nog te bewijzen 'proof-of-concept', niet als een voorspelling van de toekomst.
- Vermijden van een unieke of grote afhankelijkheid van één type feedstock of energiedrager door verschillende, maar compatibele productieroutes naar producten mogelijk te maken.
- Het inbouwen van innovatieve technologieën die verder onder het Moonshot innovatieprogramma onderzocht kunnen worden.

- Waar mogelijk in te zetten op industriële symbiose (bijvoorbeeld tussen staal en chemie en/of voeding).
- Maximaal rekening houden met de bestaande waardeketens en clustering van het industrieel weefsel op basis van onze voorafgaande analyse, de uitgevoerde bedrijfsbezoeken en talrijke gesprekken met sectorfederaties. Significante reducties zouden daardoor behaald kunnen worden zonder dat waarde vernietigd hoeft te worden (i.e. fabriek hoeven niet te sluiten of afgebroken te worden).

Naast voorgaande stappen is er rekening gehouden met:

- Geplande grote investeringen, vnl. in de Antwerpse haven, die technologiekeuzes beperken.
- Een groter gewicht voor circulaire technologie omwille van verwachte strengere EU regelgeving m.b.t. circulaire kunststof.

De scenario's zijn opgebouwd o.b.v. wetenschappelijk onderzoek, overleg met verscheidene experts en gevalideerd volgens de governance van het project. Tijdens verschillende werksessies zijn de onderliggende assumpties, technologie-keuzes, datapunten, etc. besproken. Daarnaast zijn deze verder besproken met experts en sectorfederaties. Vervolgens zijn deze ook finaal besproken tijdens de stuurgroepen van het project.

Product	Technologieën	Efficiëntie	Brandstof-transitie	Mate van CO ₂ -afvang
Chemie: HVC's	<ul style="list-style-type: none"> • 15% ethaan stoomkraken (start in 2020-2025, blijft dan constant tot 2050) • 24% propaan dehydrogenatie (stijgt tot 24% in 2025, blijft dan constant tot 2050) • Tussen 2035-2050 volledige vervanging van nafta stoomkrakers door: <ul style="list-style-type: none"> ○ Schokgolf reactor (15%) ○ MTO (6%) & MTA (4%) ○ Ethanol dehydratie (5%) ○ Biogebaseerde, gecombineerde route (5%) ○ Katalytisch kraken van afval (11%) ○ Chemolyse afval (11%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie voor bestaande technologieën • 12,5% verbeterde efficiëntie voor nieuwe technologieën 	• Geen wijziging (komt indirect via de technologie mix)	<ul style="list-style-type: none"> • 80% opvang van CO₂ • CO₂-afvang vangt aan in 2035 en neemt toe tot 80% in 2050
Chemie: Ammoniak	<ul style="list-style-type: none"> • 40% vervanging van Haber-Bosch door CO₂-arme technologieën (gebruik van H₂ en N₂) tegen 2050. Vervanging start in 2035. 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie voor Haber-Bosch • Geen verbetering voor de koolstofarme technologieën (komt reeds door H₂-productie) 	<ul style="list-style-type: none"> • 20% van aardgas voor energie schakelt over op elektriciteit voor Haber-Bosch • 25% van resterend aardgas naar syn-brandstoffen (niet als feedstock maar voor energie) 	<ul style="list-style-type: none"> • 89% opvang van resterende Haber-Bosch uitstoot • CO₂-afvang vangt aan in 2025, en neemt toe tot 89% in 2030
Chemie: Chloor	<ul style="list-style-type: none"> • Één technologie (zie Appendix A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verhoogde efficiëntie die leidt tot 30% minder elektriciteit en brandstofverbruik per ton product in 2050 t.o.v. 2015. 	<ul style="list-style-type: none"> • 20% van aardgas naar elektriciteit • 25% van resterend aardgas naar syn-brandstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen CO₂-afvang toegepast

Product	Technologieën	Efficiëntie	Brandstof-transitie	Mate van CO ₂ -afvang
Chemie: H ₂	<ul style="list-style-type: none"> • 16% import • Overige binnenlandse productie als volgt: • 44% SMR (met CO₂-afvang) • 41% elektrolyse • 15% methaan pyrolyse • Elektrolyse start in 2025-2030, methaan pyrolyse start in 2035 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie voor SMR • 38% verbeterde efficiëntie elektrolyse in 2040 • 12,5% verbeterde efficiëntie voor methaan pyrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen wijziging (komt indirect via de technologie mix) 	<ul style="list-style-type: none"> • 89% opvang van resterende SMR-emissies • CO₂-afvang vangt aan in 2025, en neemt toe tot 89% in 2030
Chemie: CO	<i>Productieniveau i.f.v. vraag uit andere sectoren</i>			
	<i>Vraag < dan aanbod via siderurgische gassen, geen bijkomende productie</i>			
Chemie: Ethanol	<ul style="list-style-type: none"> • 12,5% import • 75% via de Steelanol route • 12,5% via de tweede generatie bio-ethanol route 	<ul style="list-style-type: none"> • 21% verbeterde efficiëntie 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen wijziging (komt indirect via de technologie mix) 	<ul style="list-style-type: none"> • 85% opvang van de resterende Steelanol productie • CO₂-afvang vangt aan in 2035, en neemt lineair toe tot 85% in 2045
Chemie: Methanol	<ul style="list-style-type: none"> • De standaard technologie voor productie is gebaseerd op syngas (CO + H₂). Dit begint op 100% in 2035 • Tegen 2050 wordt 25% van alle methanol via biomassa geproduceerd. Begint in 2035 en groeit tot 25% in 2050 • Tegen 2050 wordt 50% van alle methanol via CCU-route (CO₂ + H₂) geproduceerd. Begint in 2035 en groeit tot 50% in 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie voor syngas tegen 2050 • 12,5% verbeterde efficiëntie voor biomassa tegen 2050 • Geen verbetering voor de CCU-route 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen wijziging 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen CO₂-afvang (dit is al toegepast bij de emissies van de H₂-productie)
Chemie: Overig	<ul style="list-style-type: none"> • Één technologie (zie Appendix A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verhoogde efficiëntie dat leidt tot 30% minder elektriciteit en energieverbruik per ton product in 2050 t.o.v. 2015 	<ul style="list-style-type: none"> • Via intermediaire warmte 	<ul style="list-style-type: none"> • Via intermediaire warmte
Raffinage: Geraffineerde brandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Één technologie (zie Appendix A) 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie tegen 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • 40% van aardgas wordt vervangen door elektriciteit • 25% van resterend aardgas wordt vervangen door syn-brandstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> • 80% opvang • CO₂-afvang vangt aan in 2035, en neemt lineair toe tot 80% in 2050
Raffinage: Nafta	<i>Netto-vraag naar nafta wordt geïmporteerd</i>			
	<i>Geen bijkomende eigen productie bovenop (bij)productie door raffinaderijen</i>			
Raffinage: Biobrandstoff en	<ul style="list-style-type: none"> • Slechts één technologie per type brandstof • Bio-methaan via integratie van stoomdrogen, stoom elektrolyse en gassificatie • Bio-ethanol via tweede generatie bio-ethanol technologie (lignocellulose biomassa tot bio-ethanol) 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie tegen 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • Niet beschikbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen CO₂-afvang toegepast

Product	Technologieën	Efficiëntie	Brandstof-transitie	Mate van CO ₂ -afvang
Raffinage: Syn- brandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • 75% binnenlandse productie • 50% van alle syn-brandstoffen zijn gebaseerd op koolstof (synthetisch methaan als gasvormige, synthetisch methanol als vloeibare vorm) • 50% van alle syn-brandstoffen zijn niet gebaseerd op koolstof (H₂ als gasvormige, ammoniak als vloeibare vorm) • Synthetische methanol en ammoniak worden geproduceerd via de CCU-route (CO₂+H₂ en N₂+H₂) • Benodigde H₂ als feedstock voor syn-brandstoffen worden via elektrolyse gemaakt 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen verbeteringen voor de productie van synthetisch methanol, methaan en ammoniak • Efficiëntieverbetering van 38% tegen 2040 voor productie van H₂ via elektrolyse (van 60 MWh in 2020 tot 37 MWh in 2040 per ton H₂) 	<ul style="list-style-type: none"> • Niet beschikbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen CO₂-afvang toegepast
Staal	<ul style="list-style-type: none"> • 13% via EAF-route (elektrische boogoven) (blijft onveranderd t.o.v. vandaag) • 87% via BOF-route (Blast Oxygen Furnace) 	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verbeterde efficiëntie voor BF-BOF en EAF route • 12,5% verbeterde efficiëntie voor de IGAR route 	<ul style="list-style-type: none"> • 15% van steenkool wordt vervangen door kunststofafval en CO₂ (via IGAR technologie) • 15% van steenkool wordt vervangen door H₂ • 15% van steenkool wordt vervangen door biomassa (na overgang tot IGAR) • Uiteindelijk leidt dit tot: 55% steenkolen, 15% (kunststof)afval, 15% H₂ en 15% vaste biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • 87,5% opvang van resterende CO₂ uit hoogovens
Warmte: Lage T (<200 °C)	<ul style="list-style-type: none"> • Vanaf 2035 vervangen elektrische boilers de brandstof boilers (lineair, tot 40% van de totale warmte in 2050) 	<ul style="list-style-type: none"> • efficiëntie van brandstof boilers stijgen van 85% in 2015 tot 90% tegen 2050 • 95% efficiëntie voor elektrische boilers 	<ul style="list-style-type: none"> • In brandstofboilers wordt tot 20% van het aardgas vervangen door bio-methaan, 20% door syn-brandstoffen (start in 2025, lineaire toename) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen CO₂-afvang (omdat dergelijke sectoren voornamelijk buiten grote clusters zitten)
Warmte: Middelhoge T (200-400 °C)	<ul style="list-style-type: none"> • Vanaf 2035 vervangen elektrische boilers de brandstof boilers (lineair, tot 20% van de totale warmte in 2050) 	<ul style="list-style-type: none"> • efficiëntie van brandstof boilers stijgen van 85% in 2015 tot 90% tegen 2050 • 95% efficiëntie voor elektrische boilers 	<ul style="list-style-type: none"> • In brandstofboilers wordt tot 10% van het aardgas wordt vervangen door bio-methaan, 22,5% door syn-brandstoffen (start in 2025, lineaire toename) 	<ul style="list-style-type: none"> • 60% opvang van de brandstof boilers • CO₂-afvang vangt aan in 2035 en neemt lineair toe tot 60% in 2050
Warmte: Hoge T (>400 °C)	<ul style="list-style-type: none"> • Geen wijziging, alle warmte wordt opgewekt in brandstofboilers 	<ul style="list-style-type: none"> • efficiëntie van brandstof boilers stijgen van 85% in 2015 tot 90% tegen 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • In 2020 draaien 80% van de brandstof boilers op aardgas, 20% draait op een combinatie van vloeibare fossiele brandstoffen, kolen en vaste biomassa • Tegen 2050 zal 20% van de fossiele brandstoffen worden vervangen door biobrandstoffen, en nog eens 20% wordt vervangen door syn-brandstoffen (beginnend vanaf 2025, daarna 	<ul style="list-style-type: none"> • Geen CO₂-afvang (omdat dergelijke sectoren voornamelijk buiten grote clusters zitten)

Product	Technologieën	Efficiëntie	Brandstof-transitie	Mate van CO ₂ -afvang
			lineaire toename tot 20% in 2050)	
Voeding	• Één technologie (zie Appendix A)	• 30% minder elektriciteit- en warmteverbruik in 2050 t.o.v. 2015	• Via intermediaire warmte Lage T (<200 °C)	• Via intermediaire warmte
Papier	• Geen wijziging (primair 46%, secundair 54%)	• 30% minder elektriciteit- en warmteverbruik in 2050 t.o.v. 2015	• Via intermediaire warmte Lage T (<200 °C)	• Via intermediaire warmte
Non-ferro	• Één technologie (zie Appendix A)	• 30% minder elektriciteit- en warmteverbruik in 2050 t.o.v. 2015	• Via intermediaire warmte Hoge T (>400 °C)	• Via intermediaire warmte
Glas	• Één technologie (zie Appendix A)	• 30% minder elektriciteit- en warmteverbruik in 2050 t.o.v. 2015	• Via intermediaire warmte Hoge T (>400 °C)	• Via intermediaire warmte
Keramik	• Één technologie (zie Appendix A)	• 30% minder elektriciteit- en warmteverbruik in 2050 t.o.v. 2015	• Via intermediaire warmte Hoge T (>400 °C)	• Via intermediaire warmte

Tabel 19 Technologieën in het verkenningsscenario.

Appendix C: Achtergrondinformatie thematische transitiepaden

Dit hoofdstuk geeft informatie m.b.t. de belangrijkste zaken van de vier thematische transitiepaden. Voor een exhaustieve uitleg, zie ook Leverbaarheid 2 'Internationale positionering, status en potentieel van Vlaanderen'.

Rationale gesimuleerde transitiepaden

- **Keuze van de vier transitiepaden:** De vier transitiepaden (elektrificatie (incl. H₂), circulariteit, biomassa en Carbon Capture) volgen uit de analyse van de mogelijke technologische mogelijkheden voor significante CO₂-reducties in de industrie (Leverbaarheid 2). Deze routes zijn ook aanwezig in de meeste andere roadmaps die recent op EU of sectoraal niveau ontwikkeld werden. Naast deze transitiepaden blijft verbetering van energie-efficiënte of efficiënte van processen een belangrijk element dat structureel is meegenomen in transitiepaden (e.g. als generieke verbetering van efficiëntie in bestaande processen of door introductie van nieuwe processen met veel betere performantie).
- **Bepaling van maximale scenario's:** Voor maximum scenario's werd rekening gehouden met technologische limieten (e.g. maximum vervanging door biomassa of maximale opvang CO₂, maximale elektrificatie) maar ook met nieuwe geplande investeringen in industriële installaties die tot 2050 operationeel zullen zijn en die vervanging door bepaalde technologieën niet toelaten.
- **Rationale voor de keuzes om tot het MIX-scenario (en de varianten erop) te komen:** Het mix-scenario is gebaseerd op volgende elementen en keuzes:
 - Hanteren van een koolstofcirculaire en CO₂-arme benadering waarbij maximaal wordt gestreefd naar valorisatie van koolstof door deze terug in te brengen in de waardeketen en emissies in de atmosfeer te vermijden.
 - Hanteren van een technologiemix die gebaseerd is op het principe van technologieneutraliteit. Hierdoor wordt geen enkel thema bij voorbaat uitgesloten. Deze technologiemix moet gezien worden als een zich nog te bewijzen 'proof-of-concept', niet als een voorspelling van de toekomst.
 - Vermijden van een unieke of grote afhankelijkheid van één type feedstock of energiedrager door verschillende, maar compatibele productieroutes naar producten mogelijk te maken.
 - Het inbouwen van innovatieve technologieën die verder onder een innovatieprogramma onderzocht kunnen worden.
 - Waar mogelijk in te zetten op industriële symbiose (bijvoorbeeld tussen staal en chemie en/of voeding).

- Maximaal rekening houden met de bestaande waardeketens en clustering van het industrieel weefsel op basis van onze voorafgaande analyse, de uitgevoerde bedrijfsbezoeken en talrijke gesprekken met sectorfederaties. Significante reducties zouden daardoor behaald kunnen worden zonder dat waarde vernietigd hoeft te worden (i.e. fabriek hoeven niet te sluiten of afgebroken te worden).

1. Thema: Biomassa

1.1 Introductie

De term biomassa staat voor hernieuwbare biologische grondstoffen die gebruikt kunnen worden voor de productie van voeding, veevoeder, biogebaseerde producten en materialen en bio-energie. Voorbeelden van biomassa zijn producten uit de landbouw zoals voedingsgewassen, producten uit de bosbouw zoals hout en de biologische fractie van industrieel en huishoudelijk afval.

- **Biogebaseerde feedstock:** om een alternatief te bieden aan fossiele feedstocks. Biogebaseerde feedstock zijn bijvoorbeeld zetmeel, suikers, plantaardige olie, dierlijke vetten of producten uit lignocellulose (i.e. vezel houdende plantaardige materie). Biogebaseerde producten kunnen in twee categorieën worden opgedeeld:
 - *Nieuwe producten met een gelijkwaardige of nieuwe functionaliteit:* zo kan gekeken worden naar bijvoorbeeld polylacticacid (PLA), de polymelkzuren die zeer gelijkend zijn aan polyethyleen of bijvoorbeeld PHA, polyhydroxyalkanoaten, als biopolymeren.
 - *Drop-in producten:* dit zijn producten die chemisch identiek zijn aan fossiel-gebaseerde producten, maar met als enig verschil de feedstocks die gebruikt zijn voor de productie. Bijvoorbeeld biogebaseerde nylon, bio-PE (polyethyleen uit biomassa), of bio-PET (polyethyleentereftalaat uit biomassa).
- **Biogebaseerde brandstoffen:** dit kan biomassa in vast vorm zijn, vloeibare vorm (zoals bio-ethanol⁸³), of gasvormig (zoals bio-methaan).

Wijdverspreid beschikbaar kan biomassa mogelijks een antwoord bieden om de afhankelijkheid van fossiele feedstocks en brandstoffen te verminderen. Verschillende processen bestaan om biomassa om te zetten voor later gebruik, e.g.:

- **Pyrolyse:** thermische ontbinding van biomassa op hoge temperaturen. Dit wordt ook wel kraken genoemd. In afwezigheid van zuurstof wordt zodoende een pyrolyse bio-olie gewonnen: bio-nafta. Deze bio-oliën kunnen vervolgens als brandstof of feedstock worden gebruikt voor chemicaliën.
- **Gassificatie (vergassing):** om organisch materiaal bij hoge temperaturen te ontleden. Hierbij kan van (ligno-)cellulose synthetisch gas (syngas) worden geproduceerd dat vervolgens een feedstock kan zijn in de productie van ammoniak, methanol en dergelijke (bijvoorbeeld voor latere omzetting van methanol naar Methanol-to-Olefins (MTO) voor het maken van kunststofproducten, of Methanol-to-Aromatics (MTA) als een alternatieve bron voor aromatische koolwaterstoffen BTX).
- **Fermentatie:** om grondstoffen (vb. suikers) via metabolische routes om te zetten naar diverse producten. Bijvoorbeeld:
 - *Hydrolyse van lignocellulose biomassa met fermentatie* waarbij tijdens de fermentatie cellulose wordt omgezet naar ethanol.

⁸³ Bio-ethanol kan naast biobrandstof ook worden gebruikt als feedstock voor de productie van HVC's.

Deze ethanol kan nadien omgezet worden naar ethyleen via ethanol dehydratatie.

- *Suiker/zetmeel gebaseerde biomassa fermentatie* waarbij tijdens de fermentatie suiker wordt omgezet naar ethanol. Deze ethanol kan nadien omgezet worden naar ethyleen via ethanol dehydratatie.
- *Biomassa slib met anaerobe fermentatie* voor de winning van biogas.
- **Transesterificatie (omestering):** om plantaardige oliën en vetten om te zetten in bijvoorbeeld biodiesel. Daar dit proces eerder voor biobrandstoffen wordt gebruikt en dit niet een directe rol in toegepaste chemie zit, komt Transesterificatie niet direct terug in het toegepaste model.

Het gebruik van biomassa in de Europese Chemische industrie was in 2010 gelijk aan **146 PJ** (= 36 PJ energie + 110 PJ feedstock)⁸⁴. In Europa is er een toenemende vraag naar biomassa, met name voor de transportsector en in industrie. In de elektriciteitssector verwacht men voor het opwekken van hernieuwbare energie een verschuiving naar goedkopere alternatieven zoals zon en wind. Voor het jaar 2050 verwacht dezelfde studie voor de Europese Chemische industrie een toekomstige vraag tussen de **400 PJ** en **2.273 PJ**.

Binnen Vlaanderen komt momenteel grofweg twee-derde van alle energie uit biomassa uit binnenlandse productie (42 PJ), versus een-derde dat momenteel geïmporteerd wordt uit het buitenland (27 PJ). Van de 69 PJ die in 2018 aan biomassa werd gebruikt, ging slechts **10 PJ** (15%) naar gebruik in de industrie.

De verwachte vraag naar biomassa in 2050 uit bovenstaande Cefic studie doorgerekend naar de Vlaamse industrie levert een vraag tussen 28 PJ en 160 PJ (weging van 7% overeenkomstig het gewicht in omzet van de Belgische Chemische industrie in de Europese Chemische industrie). Het centraal verkenningsscenario (**MIX**), met **61,2 PJ** voor de industrie (+50 PJ t.o.v. het huidig peil), lijkt op het eerste zicht realistisch/in lijn met Cefic studie.

1.2 Randvoorwaarden biomassa

- **Beschikbaarheid:** Volgens de 'Atlas of EU biomass potentials'⁸⁵ zal in een duurzaam scenario voor 2030 meer dan **3.000 PJ** aan houterige biomassa beschikbaar moeten zijn van stro (2.000 PJ), bosbouwresiduen (786 PJ) en besnoeiing (370 PJ) in de EU. Er zijn echter belangrijke regionale verschillen in Europa voor wat betreft lokale beschikbaarheid. Deze biomassa concurreert niet met deze van de voedingssector.
- Voor Vlaanderen betreft een toekomstige potentiële vraag naar biomassa voor industriële toepassingen van 61,2 PJ slechts 2% van dit totale EU-aanbod. Volgens dezelfde 'Atlas of EU biomass potentials' is er **lokaal** (=België) maar ongeveer **30 PJ beschikbaar** aan bovenstaande bronnen. *Er zijn geen aparte cijfers beschikbaar voor het aanbod in Vlaanderen van deze 30 PJ.* Dit impliceert dat er

⁸⁴ N.N. (2019). European chemistry for growth. Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future. Cefic.

⁸⁵ Elbersen B., et al., 2012, Atlas of EU biomass potentials Deliverable 3.3: Spatially detailed and quantified overview of EU biomass potential taking into account the main criteria determining biomass availability from different sources.

in het centraal verkenningsscenario (**MIX**) tussen de **30 PJ en 50 PJ extra import** vereist is. De hoeveelheid aan te importeren biomassa hangt af van de concurrerende vraag voor transport, elektriciteit en warmte. Hierbij zijn de aannames dat de vraag in andere sectoren constant blijft; met 30 PJ import dient lokaal beschikbare biomassa integraal voor de Vlaamse industrie gebruikt kunnen worden; met 50 PJ import kan 20 van de 30 PJ aan lokaal beschikbare biomassa nog naar andere sectoren en regio's in België gaan. De minimaal te importeren hoeveelheid biomassa stemt ongeveer overeen met wat er vandaag reeds geïmporteerd wordt (27 PJ). In het **BIO max**-scenario gaat het om 6% van EU-aanbod en 150 à 170 PJ aan extra import. Daarnaast moet er ook rekening gehouden worden dat er ook biomassa gebruikt kan worden voor de elektriciteitsproductie of andere energieopwekking. Overall in Europa zal er een toenemende vraag naar biomassa zijn. Vlaanderen zou ook zeker de eigen productie van biomassa moeten stimuleren. Maar de productie van biomassa is bijna volledig grond gebonden, en grond is ook schaars in Vlaanderen. Andere manieren om biomassa te produceren op een efficiënte en duurzame manier op kleine oppervlakte zijn in die context relevant.

- **Indirecte emissies:** De indirecte emissies bij productie, verwerking en transport van biomassa kunnen **substantieel** zijn:
Voor het type biomassa in scope (zie bovenstaand) gaat het om 4-12 kg CO₂/GJ (Solid and gaseous bioenergy pathways, EC 2015), oftewel:
 - **MIX**-scenario: 360 kton CO_{2eq}. ($60 \cdot 10^6 \text{ GJ} \cdot 6 \text{ kg CO}_2/\text{GJ}$), aanname toevoer binnen straal 500 km.
 - **BIO max**-scenario: 1,4 Mton CO_{2eq}. ($180 \cdot 10^6 \text{ GJ} \cdot 8 \text{ kg CO}_2/\text{GJ}$), aanname toevoer binnen straal van 2500 km.
 Dit doet in zekere mate afbreuk aan het groene karakter van biomassa. Gezien het belangrijke aandeel van transport (typisch meer dan de helft) in de indirecte emissies, is het belangrijk van nabije toevoer te verzekeren (lokaal, Frankrijk, Duitsland). Een vergroening van transport dringt zich op.
- **Competitie met andere sectoren:** Indien de biogebaseerde productie substantieel groeit, kan er concurrentie ontstaan tussen de verschillende sectoren omtrent het gebruik van biomassa (bijv. voor gebruik in vervoer, energie, voeding, chemie). Voor het model zijn enkel biomassa routes genomen die kunnen werken met lignocellulose biomassa (hout, houtafval, stro, e.d.), en dus niet direct moeten concurreren met biomassa voor de voeding.

1.3 Biogebaseerde transitiepaden

Voor het biogebaseerde-transitiepad, als met de andere transitiepaden, zijn verschillende technologieën onderzocht. Een olijsting van deze technologische innovaties zijn opgenomen in Appendix A. Voor biomassa zijn deze in drie groepen onder te verdelen:

1. Biomassa als feedstock, e.g.:
 - a. Ethanolproductie via lignocellulose met transformatie van ethanol naar ethyleen in de chemische waardeketen.
 - b. Methanolproductie uit lignocellulose (incl. via syngasproductie).
 - c. Alternatieve polymeren uit biomassa zoals PLA (als vervanger voor polyethyleen).

- d. Biomassa voor de synthese van bio-kool als (gedeeltelijke) vervanger van steenkool in de staalproductie. De biogene fracties in de hoogovengassen kunnen verder gebruikt worden voor de productie van bio-ethanol/-methanol.
2. Biomassa voor gebruik als energiebron:
 - a. Bio-methaan ter vervanging aardgas.
 - b. Bio-ethanol ter vervanging van vloeibare brandstoffen (slechts in beperkte mate toegepast onder de verschillende scenario's).
 - c. Biomassa als energiebron voor andere industriële processen.

Binnen de gesimuleerde scenario's (**BIO max**, **MIX** en de twee varianten) wordt dit transitiepad op volgende wijze ingezet:

- Biomassa als input in de productie van chemicaliën.
- Biomassa als input in de staalproductie.
- Biobrandstofproductie zoals ethanol en bio-methaan.
- Biomassa voor gebruik in energieproductie (warmte).

2. Thema: Circulariteit

2.1 Introductie

Door het stimuleren van een circulaire economie kunnen emissies verder verminderd worden door producten te hergebruiken die reeds geproduceerd werden. Het potentieel voor kunststoffen is significant.

Eenzijds is er de prioriteit binnen de Europese Unie om 55 % van de plastic verpakkingen te recyclen vastgelegd in de Europese strategie voor plastic in een circulaire economie. Anderzijds is het gebruik van recycelaat uit *postconsumer* afval op 6 % geraamd van de hoeveelheid kunststoffen die geproduceerd worden in België⁸⁶.

Voor kunststoffen zijn er twee technieken die complementair met elkaar kunnen worden gebruikt:

- Bij **mechanische recyclage** worden op basis van fysische processen kunststoffen terug naar basisbestanddelen verwerkt. De energie die gebruikt werd om de kunststof te produceren blijft aldus behouden. Er stellen zich echter beperkingen op vlak van gecombineerde producten en zuiverheid, karakteristieken van het product bij einde leven (bij meermaals hergebruik via mechanische recyclage) of in toepassing in bepaalde industrieën zoals de voedingsindustrie.
- Bij **chemische recyclage**, kunnen aanvullend op mechanische recyclage einde leven plastic (end-of-life plastic) terug als feedstock gebruikt worden voor productie van nieuwe kunststoffen. Chemische recyclage is zeer energie-intensief omdat chemische verbindingen terug tot basis bouwstenen herleid moeten worden, en heeft ook zijn eisen op vlak van zuiverheid van de aangeboden kunststoffen.

In deze studie wordt de nadruk gelegd op chemische recyclage en haar technologieën. Mechanische recyclage wordt indirect ook meegenomen doordat de levensduur van producten op zich verlengd wordt en is een belangrijke toepassing om kunststof te recyclen. Verschillende processen bestaan om chemische scheiding van kunststoffen te realiseren, e.g.:

- **Chemolyse:** het gebruiken van een oplosmiddel samen met warmte om de polymeren af te breken tot monomeren. Enkel toepasbaar voor bepaalde types plastic (e.g. PET) en zuivere-afvalstromen komen voor dit proces in aanmerking.
- **Pyrolyse:** de thermische ontbinding of kraken van kunststoffen op hoge temperaturen en afwezigheid van zuurstof wordt zodoende een olie of gas gevormd om dat (na nabewerking) als een vorm van nafta terug omgevormd kan worden naar HVC's via nafta stoomkraken. Dit proces kan toegepast worden bij courante kunststoffen zoals polyetheen, polypropreen en polystyreen maar ligt moeilijker voor PVC wegens aanwezigheid van chloor.
- **Katalytisch kraken:** Gelijkaardig aan het pyrolyse proces maar met gebruik van nieuwe katalysatoren die proces op lagere temperatuur mogelijk maken en tot directe omzetting naar HVC's kunnen leiden.

⁸⁶ Agoria & essencia: Belgische Kunststofindustrie en circulaire economie – waar staan we? (2019).

- **Gassificatie (vergassing):** bij hoge temperaturen scheiden van kunststoffen via thermochemische conversie naar voornamelijk syngas. Dit proces is toepasbaar op koolstof houdend afval.

2.2 Randvoorwaarden

- **Hoge energiebehoefte:** Er is een hogere energie-intensiteit bij chemische scheiding dan bij mechanische scheiding omdat de chemische verbindingen terug tot basis bouwstenen herleid worden. Dit brengt veel CO₂-emissies met zich mee indien deze energiebehoefte wordt ingevuld met fossiele energiedragers.
- **Het verrekenen van de impact van vermeden emissies in de huidige scope van ETS:** Onder de huidige ETS-regels hebben hogere recycling en het vermijden van emissies uit afvalverbranding geen impact op de CO₂-reducties van industriële sectoren. Zodoende geeft het EU ETS momenteel geen stimulans voor recycling van kunststoffen. Dit kan geredieerd worden door het toepassingsgebied van het EU ETS uit te breiden naar de afvalverbrandingssector.
- **Opschaling van chemische recycling door het uitbouwen van platvorm(en) geconnecteerd met het chemisch cluster in Antwerpen:** Het is wenselijk om hubs uit te bouwen voor chemische scheiding van kunststoffen dicht bij de chemische cluster in Antwerpen, om een optimale koppeling in de waardketen te bereiken. Er dient ook verder onderzoek verricht te worden naar het recyclen van Thermosets. Verder dient ook de logistieke stroom naar de platvorm(en) opgezet te worden.
- **Stabiele afvalstroom:** Het gebruik van recyclaat dient in normen, specificaties en wetgeving verder geïntegreerd te worden met inachtneming van de technische eisen, zonder een toegeving op vlak van veiligheid en gezondheid voor personen en milieu te doen. Zodoende kan gezorgd worden dat er een stabiele afvalstroom aan recyclaat is, met focus op de kwantiteit, samenstelling en kwaliteit.

2.3 Circulaire transitiepaden

Zie Appendix A voor een olijsting van alle technologische innovaties die mee zijn opgenomen in het model, en waarvan een deel wordt gebruikt voor het circulaire-transitiepad.

Binnen de gesimuleerde scenario's (**CIRC max**, **MIX** en de twee varianten) wordt dit transitiepad op volgende wijze ingezet:

- Kunststofafval voor gebruik als input in de productie van chemicaliën.
- Kunststofafval voor gebruik als input in de staalproductie.
- De vraag naar feedstocks groeit verder niet (wegens meer hergebruik, hogere efficiëntie en mechanisch recyclen).

3. Thema: Elektrificatie en H₂

3.1 Introductie

Dit thematische transitiepad bekijkt hoe elektrificatie en H₂ tezamen een rol kunnen spelen in de decarbonisatie van de industrie. Elektrificatie als transitiepad heeft voornamelijk betrekking op de volgende gebieden:

- **Elektrificatie van industriële warmte:** elektrificatie van boilers die gebruikt worden om de industriële warmte te genereren die nodig zijn
- **Elektrificatie als radicale proces transformaties:** om zo meer processen op elektriciteit te laten verlopen i.p.v. fossiele brandstoffen, en om tegelijkertijd ook energie efficiëntie te verbeteren. Bijvoorbeeld elektrisch kraken.
- **Elektrificatie van H₂:** H₂ kan via elektrolyse worden geproduceerd. H₂ kan daarna veelvuldig ingeschakeld worden. De rest van dit hoofdstuk zoomt hier daarom op in.
- **Elektrificatie gelinkt aan CO₂-afvang:** CO₂-afvang is een beloftevolle applicatie om de industrie te decarboniseren. Dit onderdeel wordt in het volgende thema in detail besproken.

H₂ wordt reeds een tijd gebruikt voor industriële toepassingen in de chemie- en raffinagesectoren. Zo wordt het bijvoorbeeld gebruikt in de ammoniakproductie en voor het kraken van ruwe aardolie. De laatste jaren komt H₂ echter steeds meer op de voorgrond als essentiële actor in de energietransitie om koolstof intensieve sectoren zoals de raffinage-, chemie- en staalsector te decarboniseren.

H₂ wordt momenteel via volgende belangrijke routes geproduceerd:

- **Grijze H₂:** via een proces genaamd methaan stoom reforming (SMR). Aardgas wordt daarbij via stoom omgezet in H₂ en koolstofdioxide.
- **Blauwe H₂:** gelijkaardige productie als grijze H₂ (via SMR) maar 90% van de CO₂-emissies wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).
- **Groene H₂:** via elektrolyse. Hiervoor worden hernieuwbare elektriciteit (zonne- en/of wind) en water als inputs gebruikt. Als outputs worden H₂ en zuurstof opgewekt. Via groene H₂ komt geen CO₂ vrij.
Er zijn twee belangrijke soorten elektrolyzers die kunnen worden gebruikt; *Polymer-Electrolyte-Membrane* (PEM) technologie of de *Alkalische* technologie. PEM-technologie is meer geschikt voor groene H₂, omdat de technologie snel kan reageren op veranderingen in de productie van energie, wat het geval is voor hernieuwbare energie.
- **Turquoise H₂:** via methaanpyrolyse. Hierbij wordt aardgas omgezet in H₂ en vaste koolstof, zonder vrijstelling van CO₂. De vaste koolstof kan gebruikt worden als feedstock in de staalindustrie.

Vandaag de dag wordt het huidige H₂-verbruik in Vlaanderen geschat op 240 kton (8 TWh) per jaar⁸⁷. Dit is voornamelijk grijze H₂, wat resulteert in een totale uitstoot van 2 Mton CO_{2eq.} per jaar⁸⁸.

⁸⁷ De vraag naar waterstof voor de ammoniakproductie via het Haber-Boschproces is niet inbegrepen in deze 240 kton, aangezien het model rechtsreeks aardgas beschouwt als feedstock voor dit proces en niet grijze waterstof als tussenproduct.

⁸⁸ Productie van grijze waterstof resulteert in een CO₂-emissies van 7-9 kton CO_{2eq.} per kton geproduceerde waterstof

3.2 Randvoorwaarden

Er zijn een aantal belangrijke uitdagingen te overwinnen om het volledige potentieel van elektrificatie en H₂ in Vlaanderen mogelijk te maken:

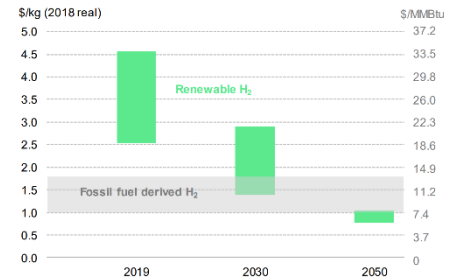
- **Kosten concurrentievermogen van koolstofarme H₂ in vergelijking met grijze H₂:** Grijze H₂ kan momenteel geproduceerd worden aan 1-1,7 USD per kg. Blauwe H₂ kost ongeveer 1 USD meer per kg omwille van de CO₂ captatie- en opslagkost, wat resulteert in 2-2,7 USD per kg. De kost voor groene H₂ is sterk afhankelijk van de kost van de hernieuwbare energie en de locatie waar deze H₂ wordt geproduceerd, maar zal zich situeren tussen 2,5 en 4,5 USD per kg. De productiekost van blauwe en groene H₂ is dus beduidend hoger dan voor grijze H₂ (zie Figuur 66).

Tegen 2030 wordt echter verwacht dat de productiekost voor grijze H₂ op zal lopen als resultaat van CO₂-belasting die de komende jaren hoogstwaarschijnlijk ingevoerd zal worden⁹⁰ (niet weergegeven in Figuur 66). Wanneer CO₂-afvang is gestandaardiseerd en opgeschaald, wordt verwacht dat de kost voor blauwe H₂ zal liggen op ongeveer 2,3 USD per kg. Ook de productiekost van groene H₂ kan dalen tot 1,5-2,9 USD per kg wanneer de kost voor hernieuwbare energie en de investeringskost voor elektrolyzers significant daalt door standaardisatie en opschaling. (Bron: Bloomberg).

- **Beschikbaarheid van betaalbare en betrouwbare klimaatneutrale energie:** Op dit moment is slechts 11,5 TWh of 14% van de totale elektriciteitsproductie in België hernieuwbaar (zie Figuur 67). Wanneer de groene H₂-productie stijgt, zal ook de productie van hernieuwbare energie moeten stijgen om voldoende stroom te kunnen voorzien en/of zullen kerncentrales langer moeten worden opgehouden. Het Europees elektriciteitsnetwerk zal op termijn evolueren naar een geconnecteerd en geïntegreerd "supergrid". Hierdoor zal import van hernieuwbare energie vanuit landen die intensief inzetten op windenergie zoals Denemarken, Noorwegen en het VK eenvoudiger worden, maar het blijft als regio Vlaanderen belangrijk om zelf voldoende in te zetten op de lokale productie van hernieuwbare energie.
- **Opslag & transport van H₂:** H₂ heeft een energiedensiteit die kleiner dan fossiele brandstoffen. Hierdoor is er 2,5-4 keer meer volume nodig om eenzelfde hoeveelheid energie aan H₂ op te slaan in vergelijking met bijvoorbeeld aardgas. H₂ efficiënt opslaan in groter hoeveelheden is een belangrijke uitdaging naar de toekomst toe.

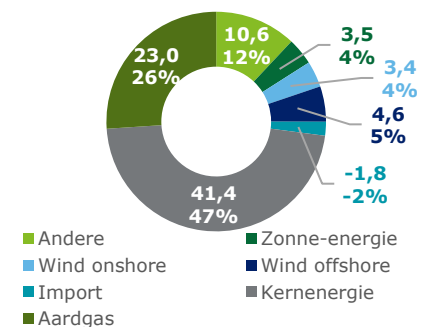
H₂ kan gasvormig, vloeibaar of onder een andere chemische vorm (bijvoorbeeld door omzetting naar ammoniak) worden opgeslagen. Kost efficiënte oplossingen op grote schaal zoals zoutgrotten & lege gasvelden zijn geografisch niet aanwezig in Vlaanderen. Daarom moet in Vlaanderen gekeken worden naar andere oplossingen.

De kost om H₂ gasvormig op te slaan onder druk in tanken varieert tussen 0,20-1,20 USD per kg, de kost om H₂ vloeibaar op te slaan varieert tussen 4,6-6,6 USD per kg en de kost om H₂ op te slaan onder de vorm van ammonium varieert tussen de 1,4-3,8 USD per kg (bron: Bloomberg). Aangezien deze kosten significant bijdragen



Figuur 66 Schatting van huidige en toekomstige productiekosten van H₂ (USD per kg H₂). Bron: Bloomberg⁸⁹.

Energiemix België 2019



Figuur 67 Energiemix België 2019. Bron: Elia.

⁸⁹ Bloomberg (2020). Hydrogen Economy Outlook. Key messages. <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>

⁹⁰ Zo zal bijvoorbeeld in Nederland een CO₂-belasting ingevoerd worden die oploopt tot 125-150 EUR per ton CO₂-emissies vanaf 2030.

bovenop de productiekost, moet gestreefd worden om H₂ te verbruiken wanneer het geproduceerd wordt, en de transportkost dusdanig te minimaliseren.

De lage energiedensiteit van H₂ maakt H₂ ook duur om via de weg of per schip te vervoeren. H₂ stroomt wel bijna driemaal sneller dan aardgas door pijpleidingen, waardoor dit een interessante optie is voor grootschalig transport. Bestaande aardgaspijpleidingen kunnen hiervoor gebruikt worden mits de nodige aanpassingen.

3.3 Elektrificatie en H₂ transitiepaden

Zie Appendix A voor een olijsting van alle technologische innovaties die mee zijn opgenomen in het model, en waarvan een deel wordt gebruikt voor het elektrificatie en H₂-transitiepad.

Binnen de gesimuleerde scenario's (**ELEC max**, **MIX** en de twee varianten) wordt dit transitiepad op volgende wijze ingezet:

- Productie van warmte komt via elektriciteit.
- Chemische processen die geëlektrificeerd kunnen worden, zullen allen worden omgezet om op elektriciteit te werken.
- H₂-productie komt tot stand via elektrolyse.

4. Thema: Carbon Capture

4.1 Introductie

Dit thematisch scenario onderzoekt de inzetbaarheid en eventuele beperkingen van het afvangen en opslaan van CO₂ (carbon capture and storage, CCS) alsook het (her)gebruik van CO₂ (carbon capture and utilisation, CCU). Bij de meeste CCU-processen speelt H₂ een belangrijke rol als feedstock/energiedrager.

De toepassing van CCS in een industriële context bestaat uit drie stappen:

1. **CO₂-afvang:** het afvangen van CO₂-emissies, gevolgd door het zuiver maken en concentreren. Afvangen van CO₂ is erg energie-intensief. Deze studie maakt een onderscheid tussen hoge en lage concentratie CO₂ stromen:
 - Afvangen van hoge concentratie CO₂-stromen (> 30% CO₂): technologie is relatief matuur, met een energieverbruik van 2,5 GJ/ton CO₂ en een ambitie om tegen 2035 naar <2 GJ/ton te gaan. Het proces vangt ongeveer 90% van de totale CO₂ af.
 - Afvangen van lage concentratie CO₂-stromen (< 30% CO₂): energieverbruik bedraagt momenteel 7-8 GJ/ton met een verwachte leercurve om tot <5 GJ/ton te gaan tegen 2035. Het proces vangt ongeveer 80 tot 85% van de totale CO₂ af.
2. **Transport:** dewelke kan gebeuren via pijpleiding of per schip.
3. **Opslag:** permanente opslag, in bestaande on- of offshore geologische formaties, typisch van uitgeputte gas- of olievelden. In functie van de transport- en opslagspecificaties zijn er één of meerdere tussenstappen vereist voor compressie.

Het voordeel van CCS-technologie is de CO₂-emissiereducties die het kan leveren op relatief korte termijn, zonder ingrijpende wijzigingen aan bestaande processen en businessmodellen. Als dusdanig kan de technologie ingezet worden als transitiemechanisme.

De toepassing van CCU kent een meer circulaire en duurzame aanpak door het (her)gebruik van de afgevangen CO₂. In combinatie met H₂ kan CO₂ ingezet worden voor aanmaak van syn-brandstoffen (e.g. methanol, ethanol, synthetisch methaan) als eindproduct of als tussenstap voor HVC-productie.

Enkele van de meest relevante technologieën hiervoor zijn de volgende:

- Synthese van CO₂ en H₂ tot methanol.
- Inzet van CO₂ (naast CO) voor de productie van ethanol (Steelanol).
- Productie van synthetisch methaan.

4.2 Randvoorwaarden

Bij het toepassen van CCS/U moet rekening gehouden worden met een aantal belangrijke randvoorwaarden:

- **Sluiten van internationale overeenkomsten voor toegang tot opslag:** omwille van beperkte opslagmogelijkheden voor CO₂ in België dient er met onze naburige landen overeen gekomen te worden om de CO₂ te kunnen uitvoeren en opslaan. Hier speelt maatschappelijke aanvaardbaarheid zowel binnen Vlaanderen als binnen deze landen een belangrijke rol, voor zowel het gebruik van

CCS/CCU als ook de internationale overeenkomsten voor de mogelijkheid tot opslag.

- **Beschikbaarheid en uitbreiding van opslagcapaciteit:** verschillende projecten (e.g. Porthos, Northern Lights) zijn aangekondigd maar nog niet operationeel. Allicht zal het nodig zijn ook andere capaciteit te benutten om aan totale opslagvraag van naburige landen te voldoen.
- **Beperking van toepassingen waarvoor CCS ingezet wordt:** gegeven de uitdagingen rond transport en opslag, is het belangrijk de inzet van CCS te beperken tot deze sectoren die slechts erg moeilijk te converteren zijn en in te zetten op onderzoek naar alternatieve routes waar mogelijk om een lock-in effect te vermijden.
- **Nood aan slimme en gefaseerde investeringen in het kader van een overkoepelend infrastructuurplan:** de inzet van CCS vereist veelal significante investeringen op vlak van infrastructuur, met name voor wat betreft transport en opslag. De voorgestelde fasering van dit thematisch scenario wordt onderstaand geformuleerd.
- **Nood aan klimaatneutrale energie aan een betaalbare prijs:** zowel CCS als CCU-technologieën zijn erg energie-intensief en vereisen, om klimaatneutraal te zijn, grote hoeveelheden aan klimaatneutrale energie. Gegeven de beperkte mogelijkheden voor hernieuwbare energie op Vlaams grondgebied, zal hier allicht een deel van buitenlandse oorsprong zijn, ingevoerd als elektriciteit of onder de vorm van moleculen (vb. H₂, ammoniak, etc.) of dient de optie van kerncentrales terug bekeken te worden.
- **Verder onderzoek/pilootprojecten** zijn nodig om werking aan te tonen en efficiëntie-winsten te boeken inzake energiegebruik (bijv. voor afvangen van lage concentratie CO₂) en investeringskost (bijv. CAPEX van afvang en opzuiveringsinstallaties). Op dit moment zijn amine-gebaseerde en de cryogene-gebaseerde CO₂-afvang de meest mature technologie. Deze technologie is echter zowel kapitaal- als energie-intensief. Er zijn een zestal andere, potentieel goedkopere en efficiëntere technologieën in onderzoeksfase, maar deze moeten nog verder ontwikkeld worden om tot het vereiste TRL9 niveau te komen. Hierbij kan Vlaanderen een voortrekkersrol spelen, en zo ook een significante bijdrage leveren aan de klimaattransitie buiten haar grenzen.
- **Aanpassing ETS:** het EU ETS moet andere transportmiddelen naast pijpleidingen erkennen zoals bijv. per schip.

4.3 Carbon Capture transitiepaden

Zie Appendix A voor een overzicht van alle technologische innovaties en hoe die mee zijn opgenomen in het model. Binnen de gesimuleerde scenario's (**CCUS max**, **MIX** en de twee varianten) wordt dit transitiepad op volgende wijze ingezet :

- CO₂ wordt in grote volumes opgevangen (incl. voor H₂).
- CO₂ wordt gebruikt voor de producties van chemicaliën en syn-brandstoffen.
- Syn-brandstoffen worden gebruikt voor chemicaliën, in raffinaderijen en voor de productie van warmte.
- Ongebruikte CO₂ wordt vervolgens opgeslagen.

Appendix D: Methode berekening CAPEX & OPEX

Methode CAPEX-berekening

De CAPEX-berekening wordt per decennium bepaald, namelijk voor de periodes 2020-2030, 2030-2040, en 2040-2050. Deze wordt bepaald aan de hand van de groei in productie via nieuwe, klimaatvriendelijke technologieën per decennium, met de aanname dat voor elke groei in productie nieuwe voldoende productiecapaciteit moet gebouwd worden om te kunnen voorzien in de extra productie. De CAPEX kosten van een deze nieuwe productiecapaciteit worden gebaseerd op de geschatte investeringskosten op het midden van een decennium.

$$\text{CAPEX}_{\text{technologie } X, \text{ periode } Y} = \text{Productiegroei}_{\text{technologie } X, \text{ periode } Y} * \text{BENODIGDE INVESTERING}_{\text{gemiddelde investeringskost/eenheid productie, periode } Y}$$

Een soortgelijke methode is van toepassing voor de technologie voor CO₂-afvang (gebaseerd op de toename in opgevangen CO₂ per technologie in elk 10-jarig interval).

Voorbeeld H₂: berekening CAPEX

In 2020 is er geen groene H₂. In 2030 wordt rekening gehouden met 2,5 TWh groene H₂, en in 2040 met 5,3 TWh groene H₂.

De CAPEX voor groene H₂ in de periode 2020-2030 is dan als volgt:

$$\text{CAPEX} = 2,5 \text{ TWh} * \text{€ investering/TWh productiecapaciteit}_{(\text{gemiddelde } 2020-2030)}$$

De CAPEX voor groene H₂ in de daaropvolgende periode 2030-2040 is dan:

$$\text{CAPEX} = (5,3 - 2,5) \text{ TWh} * \text{€ investering/TWh productiecapaciteit}_{(\text{gemiddelde } 2030-2040)}$$

Deze methode geeft een inschatting van de benodigde investeringen in nieuwe, emissie-arme technologieën⁹¹ (per technologie) op een interval van 10-jaar. Echter, deze berekening neemt nog geen CAPEX in rekening m.b.t. enige vervanging of renovatie van bestaande productiefaciliteiten, en m.b.t. infrastructuur (bijv. voor transport van waterstof, CO₂ en elektriciteit). **Ook moeten de berekende investeringen niet beschouwd worden als volledig additionele investeringen!** Voor een stuk zullen deze investeringen in nieuwe productietechnologieën, andere investeringen vervangen die onder 'business-as-usual' zouden moeten gebeuren om de

⁹¹ De aangekondigde investeringen van Ineos en Borealis in Antwerpen werden niet meegenomen in de berekening, gezien deze niet worden beschouwd als 'emissie-arme' technologieën. De vereiste investeringen in CO₂-afvang in deze installaties in de toekomst zijn wel meegenomen in de berekening.

huidige productiecapaciteit met bestaande technologieën op peil te houden (onderhoud en vervanging). De vereiste investeringen onder business-as-usual konden voor deze studie echter niet berekend worden, door gebrek aan info over de vervangingstermijnen van het bestaande productiepark en hun gerelateerde investeringsnoden. Daardoor konden de additionele investeringen in de gesimuleerde verkenningsscenario's t.o.v. 'business as usual' niet gekwantificeerd worden.

Hieronder volgt een gedetailleerd overzicht van de elementen die zijn meegenomen in de CAPEX berekening:

Sector	Product	Gedekt onder CAPEX berekening
Chemie:	Ammoniak	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste productiecapaciteit voor lage CO₂ route (H₂ + N₂). De CAPEX voor de vereiste H₂ productie wordt toegewezen onder H₂ productie Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor Haber Bosch route
Chemie	High Value Chemicals	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste productiecapaciteit voor nieuwe, emissiearme technologieën (alles behalve nafta stoomkrakers, ethaanstoomkrakers en PDH units) Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor alle technologie waar carbon capture wordt toegepast (inclusief nafta stoomkrakers, ethaanstoomkrakers en PDH units)
Chemie	Waterstof	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste productiecapaciteit voor electrolyzers en H₂ via methaanpyrolyse Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor SMR route CAPEX voor de productie van waterstof om syn-brandstoffen worden niet aangerekend aan de chemie, maar bij de productie van syn-brandstoffen (zie onder)
Chemie	Ethanol	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste productiecapaciteit voor ethanol (alle routes, inclusief Steelanol) Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor Steelanol route
Chemie	Methanol	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste productiecapaciteit voor methanol (alle routes)
Chemie	Overige	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor CO₂-afvang toegepast op warmteproductie
Staal	Staal	<ul style="list-style-type: none"> CAPEX gerelateerd aan IGAR technologie Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor de hoogovens CAPEX gerelateerd aan Steelanol productie is meegerekend onder chemie CAPEX gerelateerd aan torreficatie van houtafval is niet opgenomen
Raffinaderijen	Geraffineerde brandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste CO₂-afvangcapaciteit voor de raffinaderijen
Overige	Papier, voeding, non-ferro, keramiek en gls	Niet meegenomen in CAPEX berekening, want: <ul style="list-style-type: none"> Geen CO₂-afvang toegepast Assumptie dat CAPEX van elektrische boiler = CAPEX brandstofboiler, en boilers hoe dan ook vervangen moeten worden tussen nu en 2050
Overige	Productie van bio- en syn-brandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> Vereiste productiecapaciteit voor productie van bio- en syn-brandstoffen inclusief electrolyzers voor productie van H₂ als feedstock voor syn-brandstoffen

Tabel 20 Elementen voor de CAPEX berekening.

De investeringsnoden per technologie zijn waar mogelijk gebaseerd o.b.v. internationale studies, en in andere gevallen o.b.v. bestaande projecten, info aangeleverd door stakeholders en/of eigen inschattingen. Er wordt vanuit gegaan dat de kosten lineair evolueren tussen 2030 en 2050. De gehanteerde assumpties inzake de investeringsnoden per technologie worden weergegeven in onderstaande tabel:

Sector	Product	Technologie	Bron + assumptie	eenheid	2030	2050
Algemeen	CO ₂ -afvang, hoge concentratie (MINIMUM)	ICF & Fraunhofer, Industrial Innovation, pathways to deep decarbonisation, part 2	Gemiddelde van ammoniak en staal	€2015/t CO ₂ - afvangcapaciteit	65	48
Algemeen	CO ₂ -afvang, hoge		Kost afgeleid uit carbon capture projectdata	€2015/t CO ₂ - afvangcapaciteit	181	159

Sector	Product	Technologie	Bron + assumptie	eenheid	2030	2050
		concentratie (MAXIMUM)				
Algemeen		CO ₂ -afvang, lage concentratie (MINIMUM)	ICF & Fraunhofer, Industrial Innovation, pathways to deep decarbonisation, part 2 Gemiddelde van ethylene en raffinaderijen	€2015/t CO ₂ -afvangcapaciteit	190	140
Algemeen		CO ₂ -afvang, hoge concentratie (MAXIMUM)	Eigen inschatting o.b.v. MER van een Vlaams project (confidentieel)	€2015/t CO ₂ -afvangcapaciteit	530	463
Chemie	Ammoniak	Low-CO ₂ route	IEA, the future of petrochemicals (O.b.v. ammoniak synthese unit (H ₂ -productie reeds elders gedekt))	€2015/t productiecapaciteit	86	86
Chemie	HVC	bio-integrated	Eigen berekeningen o.b.v. Liao et. al (2020), A sustainable wood biorefinery for low-carbon footprint chemicals production	€2015/t productiecapaciteit	939	939
Chemie	HVC	catalytic-reforming	IEA, the future of petrochemicals (O.b.v. nafta catalytic cracking)	€2015/t productiecapaciteit	2727	2727
Chemie	HVC	ethane-oxy-dehydrogenation-chemloop	Eigen inschatting, o.b.v. CAPEX nafta stoomkraker	€2015/t productiecapaciteit	1081	1081
Chemie	HVC	ethanol-dehydration	Eigen inschatting, o.b.v. CAPEX nafta stoomkraker (Exclusief ethanolproductie (reeds elders aangerekend))	€2015/t productiecapaciteit	338	338
Chemie	HVC	methanol-to-Aromatics	IEA, the future of petrochemicals (Exclusief methanolproductie (reeds elders aangerekend))	€2015/t productiecapaciteit	890	890
Chemie	HVC	methanol-to-Olefins	IEA, the future of petrochemicals (Exclusief methanolproductie (reeds elders aangerekend))	€2015/t productiecapaciteit	890	890
Chemie	HVC	naphta-cracker-Shockwave	Eigen inschatting, o.b.v. CAPEX nafta stoomkraker	€2015/t productiecapaciteit	1403	1403
Chemie	HVC	oxydative-coupling-methane	Eigen inschatting, o.b.v. CAPEX nafta stoomkraker	€2015/t productiecapaciteit	3740	3740
Chemie	HVC	plastic-waste-chemolysis	Eigen inschatting, o.b.v. CAPEX nafta stoomkraker	€2015/t productiecapaciteit	935	935
Chemie	H ₂	Electrolysis	IEA, the future of hydrogen	€2015/MWh productiecapaciteit	129	82
Chemie	H ₂	Methane-pyrolysis	IEA, the future of hydrogen	€2015/MWh productiecapaciteit	78	60
Chemie	ethanol	Bio-second-gen	de Jong et al. (2017). Cost optimization of biofuel production. Elsevier Ltd	€2015/MWh productiecapaciteit	284	284
Chemie	ethanol	Steelanol	o.b.v. input stakeholder herkend van €200/t staal	€2015/MWh productiecapaciteit	165	165
Chemie	methanol	CO&H ₂ (syngas route)	IEA, the future of petrochemicals o.b.v. methanol synthesis uni (Exclusief H ₂ -productie (reeds elders aangerekend))	€2015/MWh productiecapaciteit	40	40
Chemie	methanol	CO&H ₂ (syngas route)	IEA, the future of petrochemicals (O.b.v. methanol synthesis uni. Exclusief H ₂ -productie (reeds elders aangerekend))	€2015/MWh productiecapaciteit	40	40
Chemie	methanol	Bio-based	O.b.v. Woodspirit project Chemelot	€2015/MWh productiecapaciteit	226	226
Biobrandstoffen	Bio-methaan	bio-fermentation	SEAI (2017) Assessment of Costs and benefits of Biogas and Biomethane in Ireland	€2015/MWh productiecapaciteit	240	240

Sector	Product	Technologie	Bron + assumptie	eenheid	2030	2050
Syn- brandstoff en	Synthetisch methaan	Methanation	IEA, the future of hydrogen (Exclusief H ₂ -productie (reeds elders aangerekend))	€2015/MWh productiecapaciteit	78	60

Tabel 21 Investeringsnoden per technologie.

Methode brandstof/feedstock kostenberekening

De formule voor de berekening van uitgaven voor brandstoffen en feedstock is als volgt:

$$\text{Kost}_{\text{energiedrager } x, \text{ jaar } z} = \text{Verbruik}_{\text{energiedrager } x, \text{ jaar } z} * \text{Prijs}_{\text{energiedrager } x, \text{ jaar } z}$$

Elke eenheid van verbruikte energie/feedstock wordt vermenigvuldigd met de verwachte marktprijs voor die energiedrager/feedstock type in dat jaar. Deze kosten worden berekend voor energie/feedstock inputs wiens productie niet in het model zijn opgenomen (e.g. elektriciteit, aardgas, geïmporteerde H₂, geïmporteerde biobrandstoffen, geïmporteerde fossiele feedstocks zoals nafta, ethaan en propaan). Om dubbeltellingen te vermijden wordt er geen kostenberekening gemaakt voor de productie van producten die reeds in het model zitten⁹². Ook de kost van de ruwe aardolie die wordt verbruikt in de raffinaderijen wordt niet mee in rekening genomen, gezien de brandstoffen die hiermee gemaakt worden voornamelijk buiten de Vlaamse industrie worden geconsumeerd (andere sectoren en/of regio's).

Energiedrager	Opgenomen in kostenberekening?
Elektriciteit	Volledig
Fossiele brandstoffen	Volledig
Vaste biomassa	Volledig
(Plastiek) afval	Volledig
Waterstof	Enkel import
Bio-methaan/-ethanol	Enkel import
Syn-brandstoffen	Enkel import
Nafta, ethaan, propaan	Enkel import
Ruwe aardolie	Neen

Tabel 22 Hoe energiedragers zijn opgenomen in kostenberekening.

De toekomstige prijs van energiedragers/feedstock wordt als volgt berekend:

$$\text{Toekomstprijs}_{\text{energiedrager } x} = \text{huidige prijs}_{\text{energiedrager } x} * \text{verwachte trend}_{\text{energiedrager } x \text{ in de EU/wereld}}$$

Waar beschikbaar wordt er voor wat betreft de huidige prijzen gewerkt met de huidige Belgische prijzen als startpunt. Aangezien de toekomstige prijstrends vaak in buitenlandse bronnen worden medegedeeld, wordt de verwachte toekomstprijs vaak bepaald a.d.h.v. van trends op EU-niveau. Indien niet beschikbaar dan wordt zelf de prijstrend op wereldniveau gebruikt.

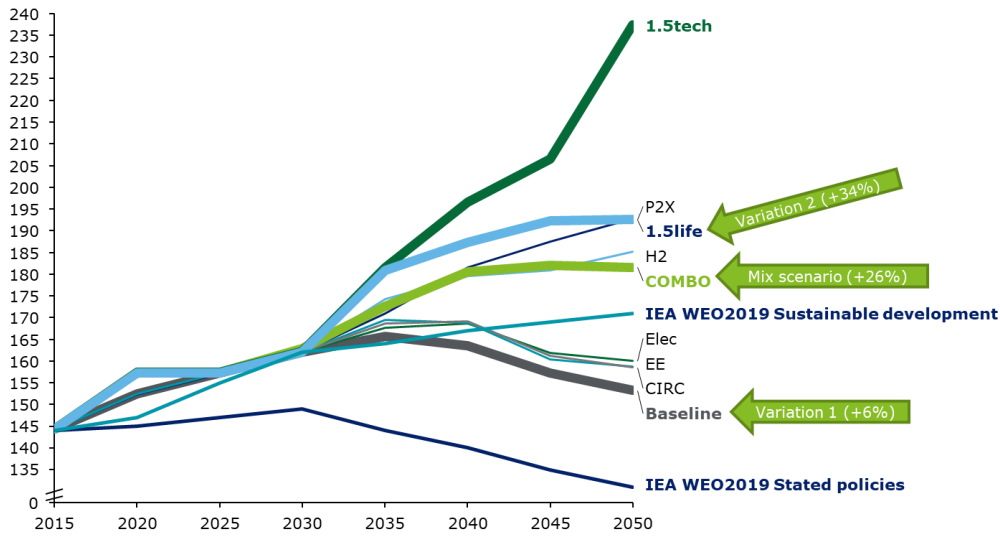
⁹² Bijv. voor waterstof die wordt geproduceerd in het model wordt geen brandstofkost aangerekend, gezien de gerelateerde CAPEX en de kosten van het aardgas- of elektriciteitsverbruik reeds elders mee in rekening worden genomen.

De volgende prijzen zitten in het model verwerkt:

Energiedrager	Huidige prijs (per MWh)	Bron	Mededeling
Elektriciteit	€65	Eurostat nrg_PC_205 Belgian non-household consumer prices, average 2015-2019	Gemiddelde in België. Exclusief BTW en andere belastingen en heffingen.
Aardgas	€19,5	Eurostat nrg_PC_205 Belgian non-household consumer prices, average 2015-2019	Gemiddelde in België. Exclusief BTW en andere belastingen en heffingen.
Steenkool	€11,7	IEA WEO 2019	IEA-prijs voor 'hard coal' in EU + €1,5/MWh belastingen en heffingen
Ruwe olie	€35	IEA WEO 2019	IEA-prijs voor 'crude oil' in EU
Nafta	€70	ICF & Fraunhofer Institut, Industrial innovation, pathways to deep decarbonization, part 2	Figuur 2.10, gem. EU-prijs, incl. belastingen en heffingen, excl. CO ₂ kosten
Plastiekafval	€25	Eurostat COMEXT	Herberekend van €300/ton PET schroot
Vaste biomassa	€18	ICF & Fraunhofer Institute, Industrial innovation, pathways to deep decarbonization, part 2	Figuur 2.10, gem. EU-prijs, incl. belastingen en heffingen, gebaseerd op huidig gebruik, excl. CO ₂ kosten
Bio-methaan	€95	IFRI, Biogas & Biomethane in Europe	= huidige productiekost
Bio-ethanol (2 ^e generatie)	€103	IEA-ETSAP Technology brief Production of Bio-ethylene	= huidige productiekost. Herberekend van \$750/ton, aangepast aan inflatie
H ₂	€160	ICF & Fraunhofer Institute, Industrial innovation, pathways to deep decarbonization, part 2	Figuur 2.10, gem. EU-prijs, incl. belastingen en heffingen, excl. CO ₂ kost
Synthetisch methaan	€203	ICF & Fraunhofer Institute, Industrial innovation, pathways to deep decarbonization, part 2	Figuur 2.10, gem. EU-prijs, incl. belastingen en heffingen, excl. CO ₂ kost
Synthetisch ammoniak	€176	Aanname dat deze 10% hoger is dan groene H ₂	Enkel een kleine rol in het model
Synthetisch methanol	€223	Aanname dat deze 10% hoger is dan synthetisch methaan	Enkel een kleine rol in het model

Tabel 23 Gebruikte prijzen in het model (€/MWh).

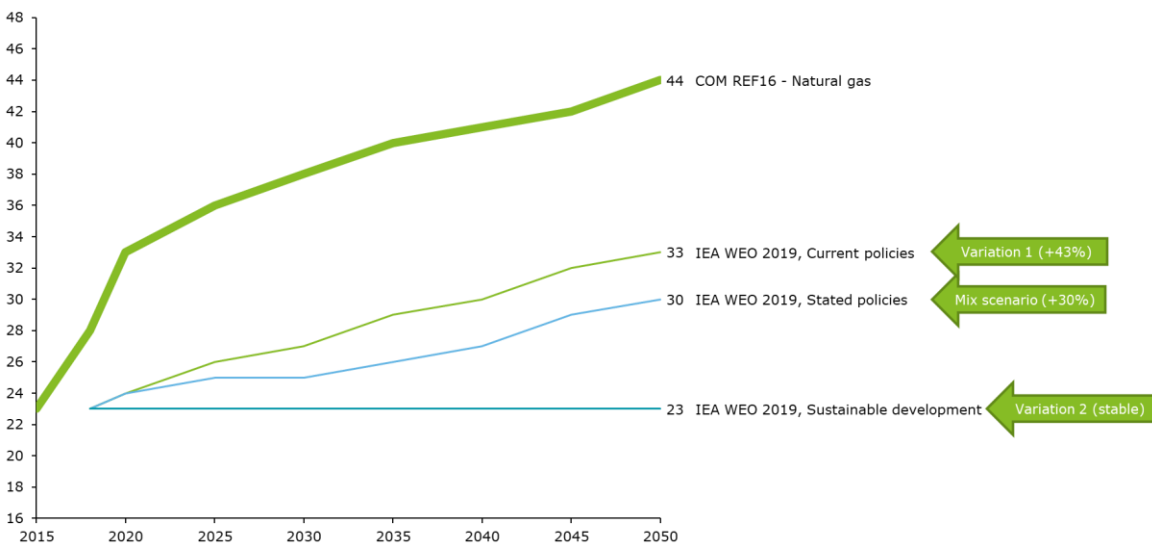
De prijsevoluties voor wat betreft elektriciteit zijn gebaseerd op de In-Depth Analysis van de Europese Commissie bij haar langetermijnstrategie "A Clean Planet for All". Deze prijsscenario's houden rekening met 1) brandstofkosten, 2) CAPEX voor het productiepark, 3) transmissie- en distributiekosten en 4) een CO₂-prijs die stijgt tot €250/ton in 2050 onder de -80% scenario's en tot €350/ton in 2050 onder de 1.5LIFE en 1.5TECH scenario's. De **relatieve prijsevolutie** die wordt waargenomen onder deze EU scenario's werd vervolgens toegepast op het huidige prijsniveau van €65: dit leidt tot een veronderstelde prijs van €82/MWh (+26%) onder het centraal verkenningsscenario (**MIX**), van €69 (+6%) onder de eerste variant (**Var1**), en van €87/MWh (+34%) onder de tweede variant (**Var2**).



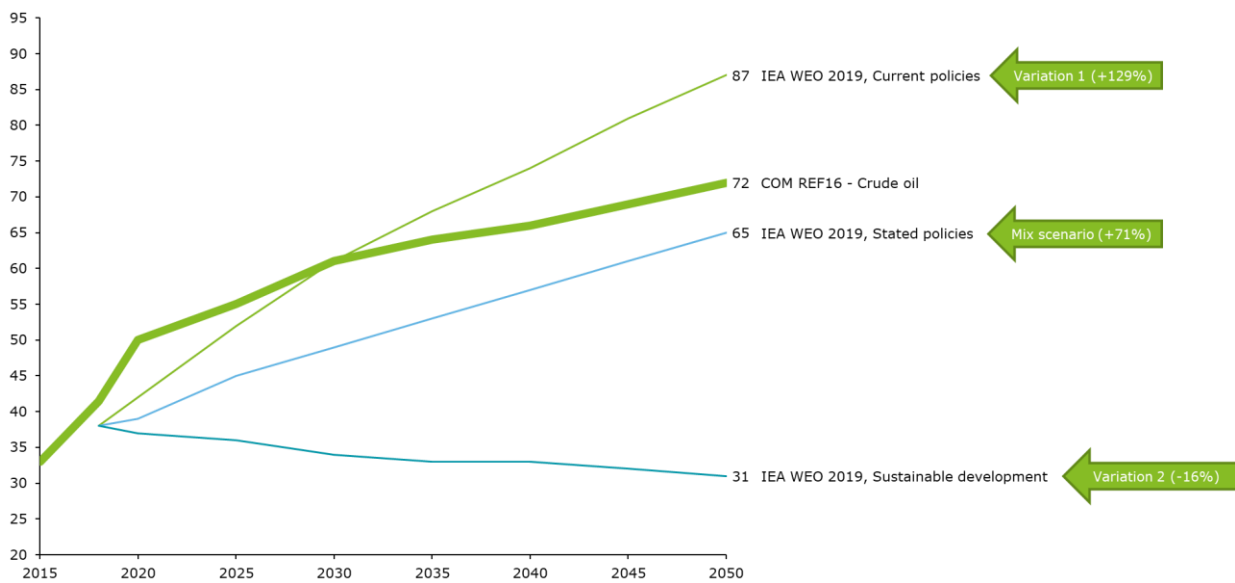
Figuur 68 Elektriciteit (€/MWh). Bron: IEA, WEO, 2019 en Europese Commissie 'A clean planet for all, In-depth analysis.

Zoals aangegeven in bovenstaande figuur gaan de EU scenario's o.b.v. PRIMES uit van een sterkere stijging dan het IEA. Dit komt onder meer omdat PRIMES de prijs berekend o.b.v. de marginale elektriciteitscentrale en een volledige doorrekening van alle kosten (productie, transmissie, distributie, CO₂ prijs, etc. ...) De assumpties die we hanteren voor elektriciteitsprijzen zijn dus eerder conservatief.

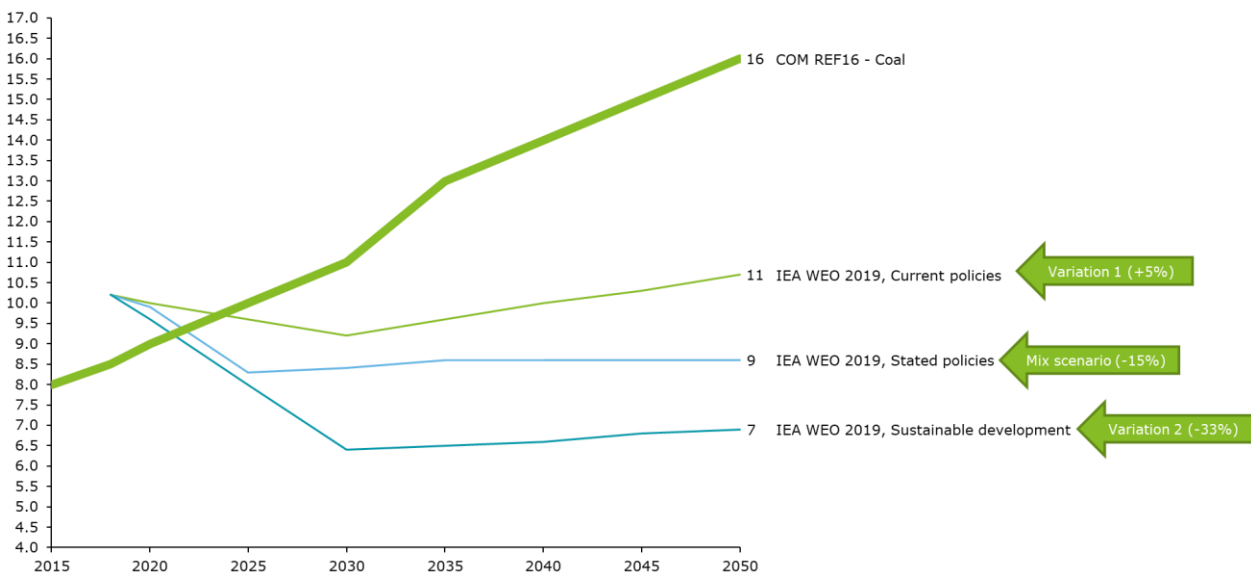
De prijsevoluties voor wat betreft fossiele energiedragers (ruwe olie, aardgas en steenkool) zijn gebaseerd op het World Energy Outlook 2019 van het Internationaal Energie Agentschap. Deze prijsevoluties houden enkel rekening met de prijzen van de energiedragers zelf. Voor afgeleide producten van ruwe aardolie (nafta, propaan, ...) wordt de prijsevolutie van ruwe aardolie gehanteerd. Ook hier werd telkens **de relatieve prijsevolutie** zoals waargenomen onder deze scenario's toegepast op de huidige prijzen die in Vlaanderen worden gehanteerd, zoals opgenomen in Tabel 23.



Figuur 69 Aardgas (€/MWh). Bron: IEA, WEO, 2019.

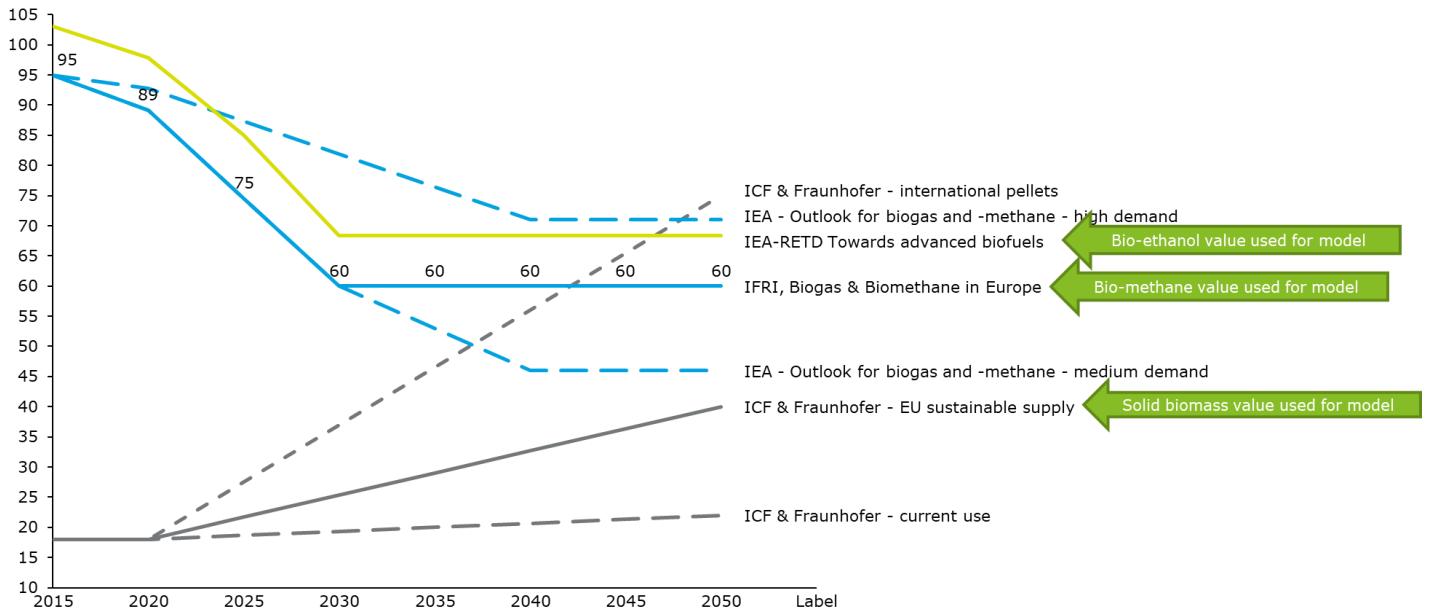


Figuur 70 Ruwe olie (€/MWh).

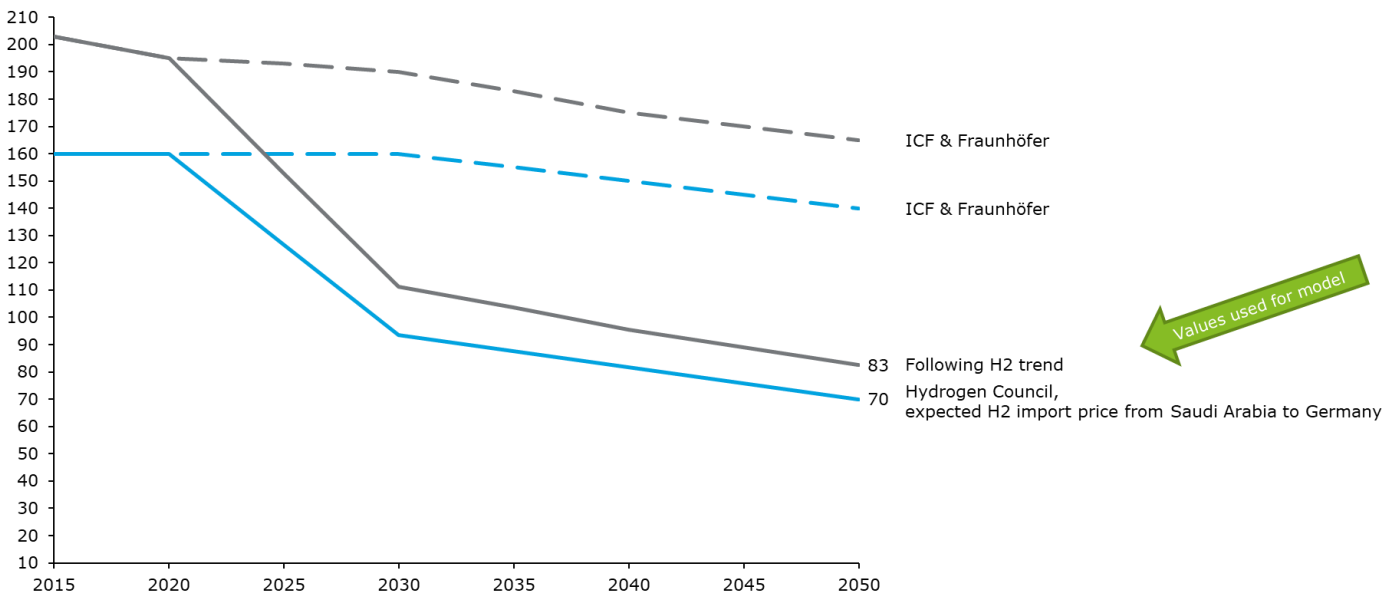


Figuur 71 Steenkool (€/MWh)

Voor andere energiedragers zoals bio- en syn-brandstoffen werden assumpties overgenomen uit andere studies, zoals hieronder weergegeven.



Figuur 72 Biomassa en biobrandstoffen (€/MWh). Bron: ICF & Fraunhofer: Scenario analysis & pathways to deep decarbonisation – part 2 (2019).



Figuur 73 H2 en syn-brandstoffen (€/MWh). Bron: CF & Fraunhofer: Scenario analysis & pathways to deep decarbonisation – part 2 (2019). Hydrogen Council, Pathway to hydrogen competitiveness.

Methode CO₂-kosten berekening

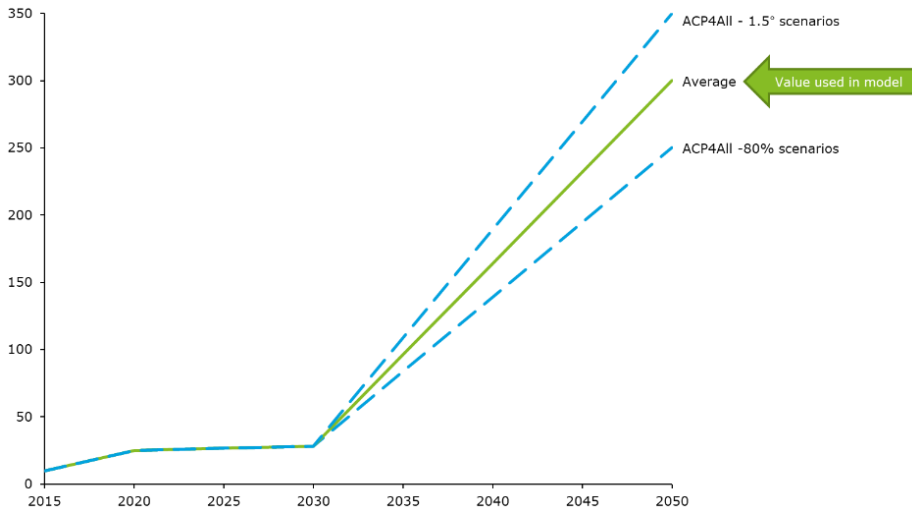
CO₂-kosten worden als volgt berekend:

$$\text{CO}_2\text{-kosten}_{\text{product } x, \text{ tech } y, \text{ jaar } z} = \text{Emissies}_{\text{product } x, \text{ tech } y, \text{ jaar } z} * \text{CO}_2\text{-prijs}_{\text{jaar } z}$$

De overige emissies (na CO₂-afvang) worden vermenigvuldigd met de geprojecteerde CO₂-prijs voor dat jaar. Deze methode houdt geen rekening met beleidsmaatregelen zoals een gratis toewijzing: de CO₂ kost wordt volledig aangerekend.

Kosten van CO₂-afvang worden meegenomen via de CAPEX/OPEX-berekeningen.

De evolutie van de CO₂-prijs is gebaseerd op de scenario's van de Europese Commissie in haar langetermijnstrategie "A Clean Planet for All", gezien deze zelfde (indirecte) CO₂-kost ook zit vervat in de gehanteerde prijsevoluties voor elektriciteit. Daarbij wordt het gemiddelde genomen van de verschillende scenario's van de Europese Commissie (stijging tot €300/ton in 2050).



Figuur 74 Geprojecteerde CO₂-vergoeding (€/ton CO₂). Bron: Europese Commissie, A clean planet for all, in-depth analysis, sectie 7.2.2.2.

Appendix E: Opbouw modellering

Algemene beschrijving

Ter onderbouwing van deze routekaart werd een nieuw simulatiemodel ontwikkeld, specifiek op maat van de Vlaamse industrie. Het model laat de gebruiker toe om via hefboomen ('levers') een aantal assumpties over toekomstige ontwikkelingen aan te nemen, waarna het model de impact hiervan berekent op vlak van:

1. broeikasgasemissies.
2. brandstof- en feedstockverbruik.
3. CAPEX, brandstof-, feedstock- en CO₂-kosten voor de implementatie van innovatieve klimaatneutrale technologieën.

In deze verschilt het model fundamenteel van optimalisatiemodellen, waarbij de gebruiker een gewenst einddoel instelt, en het model automatisch het optimale traject (bijv. vanuit kostenoptimalisatie) uitrekent om dit vooropgestelde einddoel te verwezenlijken. Wel kan de gebruiker, indien de gehanteerde assumpties leiden tot een ongewenste uitkomst, via een iteratief proces de assumpties bijsturen.

In het algemeen kunnen de beschikbare hefboomen verdeeld worden over 5 dimensies:

- Verwachte evolutie van productieniveaus (per type industrieel product).
- Verwachte evolutie van de technologiemix om deze productie te verwezenlijken (per type industrieel product).
- Verwachte efficiëntieverbeteringen voor deze verschillende technologieën.
- Verwachte evolutie inzake fuel switches binnen elke technologie (bijv. elektrificatie, switch van vast/vloeibaar naar gasvormig, switch naar biomassa, switch naar syn-brandstoffen).
- Verwachte inzet van end-of-pipe CO₂-afvang (per technologie).

Voor elke hefboom werden vier verschillende ambitieniveaus gedefinieerd (van 'business as usual' tot zeer ambitieuze aannames). Bijv. via de hefboom 'evolutie van het productieniveau van staal' kan dit productieniveau naar 2050 sterk stijgen, beperkt stijgen, stabiel blijven of beperkt dalen t.o.v. het huidige niveau. In totaal zijn er zo 188 verschillende hefboomen meegenomen in het model, wat toelaat om op detailniveau te variëren. Aan de hand hiervan werden ter ondersteuning van deze routekaart verschillende scenario's ontwikkeld, waarbij elk scenario bestaat daarbij uit een set van aangenomen assumpties.

Scope van het model

Emissies

Het model berekent de emissies (proces & energetisch), het brandstof- en feedstockverbruik en de kosten die gerelateerd zijn aan de productie van de Vlaamse industrie die is gevat door deze studie.

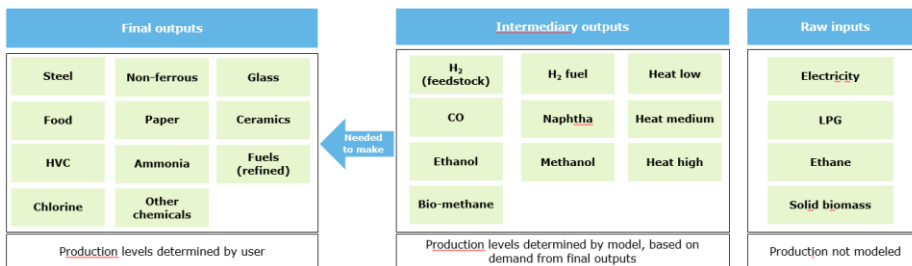
Emissies, energieverbruik en kosten gerelateerd aan volgende zaken worden niet berekend door het model:

- Alle activiteiten vroeger in de waardeketen: ontginning en bewerking van feedstocks en energiedragers en het transport hiervan naar de Vlaamse industrie, ...

- Opwekking van elektriciteit die wordt geconsumeerd door de Vlaamse industrie (tenzij in geval van eigenproductie in WKK's).
- Alle activiteiten later in de waardeketen: eventuele emissies gelinkt aan de consumptie van de industriële producten alsook emissies gelinkt aan einde van de levensduur van deze producten.

Industriële activiteiten

Via het model wordt de productie van 21 industriële outputs gesimuleerd: 11 'finale' outputs (waarvan de gebruiker assumpties moet maken over de verwachte productieniveaus), en 10 'intermediaire' outputs waarvan het model zelf bepaalt hoeveel er geproduceerd moeten worden i.f.v. de vraag vanuit de 'finale' outputs.



Figuur 75 Modellering industriële outputs.

Tijdsspanne

Het model dekt de periode 2015⁹³ t.e.m. 2050, en geeft waarden per vijf jaar. De focus ligt daarbij op het eindpunt in 2050, maar het traject daarnaartoe kan eveneens aangepast worden door te kiezen 1) wanneer een bepaalde evolutie start, 2) wanneer deze evolutie haar eindpunt bereikt en 3) of de evolutie tussen het start- en het eindpunt lineair dan wel via een S-curve evolueert.

Voorbeeld 1: in het toekomst scenario begint vanaf de CO₂-afvang bij de productie van ammoniak via de Haber Bosch technologie. De hoeveelheid CO_{2eq.} die wordt afgevangen stijgt lineair tot een niveau van 89% van alle emissies in 2030. Tussen 2030 en 2050 blijft deze ratio (89% stabiel).

Voorbeeld 2: alle scenario's gaan er van uit dat er in de periode 2021-2025 een nieuwe ethaanruiker wordt gebouwd voor de productie van HVC's (investering aangekondigd door Ineos). In het model is dit in rekening gebracht door zowel het productieniveau van HVC's als het marktaandeel van de 'ethaanstoomruiker technologie' te laten stijgen tussen 2020 en 2025, en dit via een S-curve.

Terwijl het model waardes berekend vanaf 2015, zijn de grafieken in dit rapport aangevuld met emissiegegevens voor 2010 en 2005 o.b.v. publiek beschikbare, historische cijfers. Zo kan ook de verhouding van de gesimuleerde emissies in 2030 en 2050 t.o.v. 2005 in kaart gebracht worden. Dit is relevant gezien 2005 als basisjaar wordt gebruikt op Europees niveau om de reductiedoelstellingen voor respectievelijk de ETS sectoren (waaronder de energie-intensieve industrie) en de niet-ETS sectoren te definiëren. Zodoende kan een vergelijking gemaakt worden van hoe de emissiereducties zoals voorzien in de gesimuleerde scenario's zich verhouden tot de reducties die op EU niveau worden voorzien voor de ETS sectoren.

⁹³ Het model kan emissies berekenen vanaf 2000. Hiervoor moet er echter historische data ingevoerd worden over energieconsumpties per sector vanaf 2000. Dit vergt een uitgebreide datacollectie die niet is gebeurd in kader van deze studie.

Specifieke verbruiken

Voor elke technologie die is gemodeleerd is het specifiek energie en feedstock verbruik in kaart gebracht. Onderstaand document geeft de specifieke verbruiken van alle gemodeleerde technologieën. De waardes geven het startpunt in het model weer, deze verbruiken kunnen vervolgens verder aangepast worden door in te zetten op efficiëntieverbeteringen (verlaagt de hoeveelheid benodigde input) en vervolgens op brandstof-omschakelingen ('*fuel switches*').





Deloitte refers to one or more of Deloitte Touche Tohmatsu Limited, a UK private company limited by guarantee ("DTTL"), its network of member firms, and their related entities. DTTL and each of its member firms are legally separate and independent entities. DTTL (also referred to as "Deloitte Global") does not provide services to clients. Please see www.deloitte.com/about for a more detailed description of DTTL and its member firms.

Deloitte provides audit, tax and legal, consulting, and financial advisory services to public and private clients spanning multiple industries. With a globally connected network of member firms in more than 150 countries, Deloitte brings world-class capabilities and high-quality service to clients, delivering the insights they need to address their most complex business challenges. Deloitte has in the region of 245,000 professionals, all committed to becoming the standard of excellence.

This publication contains general information only, and none of Deloitte Touche Tohmatsu Limited, its member firms, or their related entities (collectively, the "Deloitte Network") is, by means of this publication, rendering professional advice or services. Before making any decision or taking any action that may affect your finances or your business, you should consult a qualified professional adviser. No entity in the Deloitte Network shall be responsible for any loss whatsoever sustained by any person who relies on this publication.