

# Bijlage 1 - Achtergrond bij de berekening van het basispotentieel voor elektrificatie in de industrie

## Analyse van de warmtebehoefte industrie

Om het gewenste beeld te verkrijgen van warmtebehoefte per locatie, sector en apparaat is het nodig gebleken om een aantal bronnen te raadplegen en te consolideren. Het betreft CBS, de MIDDEN database van PBL en de Large Combustion Plant Database (LCP). Consolidatie van al deze bronnen bleek nodig om een bruikbaar beeld te construeren.

De CBS data betreffen de overall getallen voor het huidige gebruik van warmte in de industrie met sector analyses. Deze zijn gebruikt voor de juiste ijking en als aanvulling. Daarnaast geeft het CBS inzicht in het gebruik van lage temperatuur en hoge temperatuur warmte.

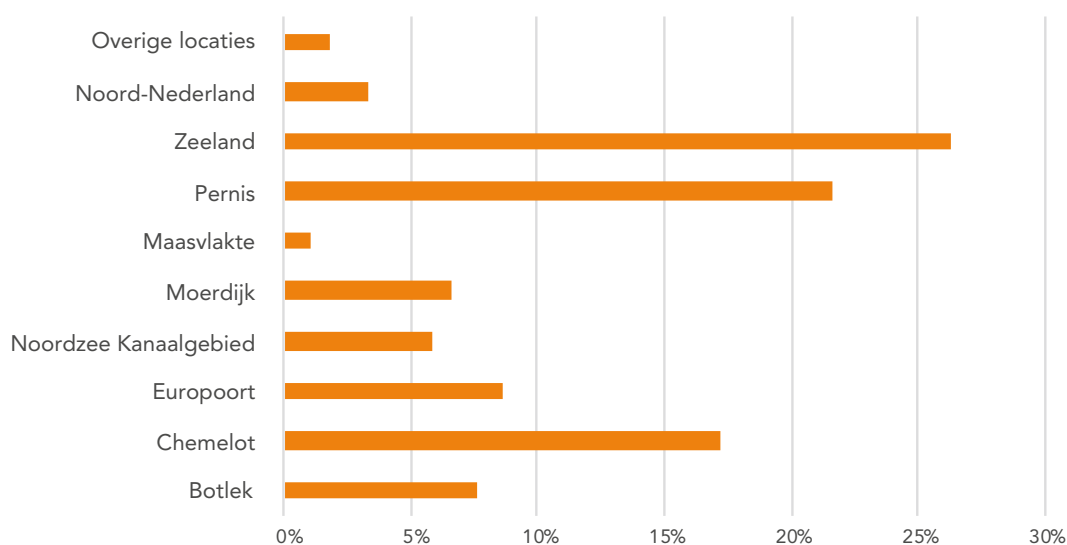
De beschikbare gedetailleerde sector analyses, uitgevoerd op basis van het MIDDEN project, geven een goede aanzet voor het hoge temperatuur warmtegebruik van de belangrijke sectoren raffinage, chemie-kraakers, kunstmest, industriële gassen en staal. Er is hierbij informatie beschikbaar over de rol van WKK's, fornuizen en boilers, maar ook over waterstofbehoefte en rest-gas productie. Deze rest-gas stromen zijn voor de meeste relevante sectoren (raffinage, petrochemie en industriële gassen) gekwantificeerd. Ze spelen een rol in de elektrificatie van de industrie omdat deze restgassen vrijkomen als fornuizen en boilers worden geëlektrificeerd. Deze restgassen kunnen vervolgens ingezet worden om blauwe waterstof te maken.

Ter aanvulling voor de andere sectoren (voeding, papier, chemie, keramiek, glas, steen) en verificatie is daarnaast de Large Combustion Plant (LCP) database gebruikt. Deze LCP database geeft voor grote apparaten ( $> 50\text{MW}_{\text{th}}$  primaire input) zoals fornuizen en boilers naar sector, capaciteit en locatie weer en betreft eveneens met name de hoge temperatuur warmte. De LCP database geeft ook voor Nederland een overzicht van de totale energie input (exclusief de Nederlandse elektriciteitsproductie) voor fornuizen, fornuizen voor conversie, boilers en industriële WKK's. De LCP database is vooral gebruikt om de hoge temperatuur warmte-distributie over de industrie clusters en apparaten te kwantificeren. Deze wordt ook gebruikt voor lage temperatuur (figuur B1.1). Op basis van typische kentallen voor het rendement van deze installaties (zie tabel B1.1) volgt uit de analyse een finale warmteproductie van ongeveer 323 PJ.

Technologie	Efficiëntie
Elektrische fornuizen	90%
Elektrische boilers	99%
Conventionele fornuizen	90%
Conventionele boilers	85%
WKK's (warmte)	55%
WKK's (vermogen)	25%

Tabel B1.1: Gebruikte rendementen voor berekeningen in de LCP database.

## van het totale energieverbruik



*Figuur B1.1 : Verdeling van finaal hoge temperatuur energiegebruik in de Nederlandse industrie berekend via de LCP database.*

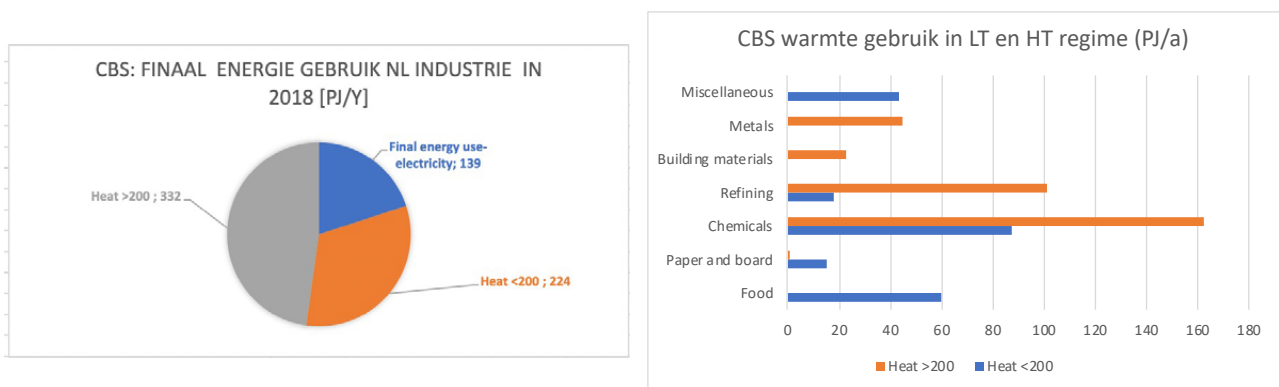
De door het CBS geleverde onderverdeling van de totale warmtebehoefte in sectoren en temperatuur regimes kan vervolgens verder worden aangescherpt - per sector - door gebruik te maken van eerdere studies (JRC, 2012), (Ecoheatcool, 2005), (Davidse Consultancy, 2012). We onderscheiden de regimes lage temperatuur (LT) en hoge temperatuur (HT) waarbij de grens bij 200°C ligt.

Sector (CBS)	Lage Temperatuur Warmtebehoefte	Bron/ commentaar
Voeding	100%	Matching processes with electrification technologies (internal TNO report, 2017)
Papier en karton	96%	Davidse Consultancy (2012): Warmte-energie, de motor van de industrie, Ontwikkelingen in het gebruik en de opwekking van industriële warmte, 2012
Chemicaliën	35%	Davidse Consultancy (2012): Warmte-energie, de motor van de industrie, Ontwikkelingen in het gebruik en de opwekking van industriële warmte, 2012
Raffinage	15%	Davidse Consultancy (2012): Warmte-energie, de motor van de industrie, Ontwikkelingen in het gebruik en de opwekking van industriële warmte, 2012
Bouw-materialen	0%	Aanname
Metalen	0%	Aanname
Diversen	100%	Aanname

*Tabel B1.2: Inschatting van de behoefte aan lage temperatuur warmte voor diverse sectoren*

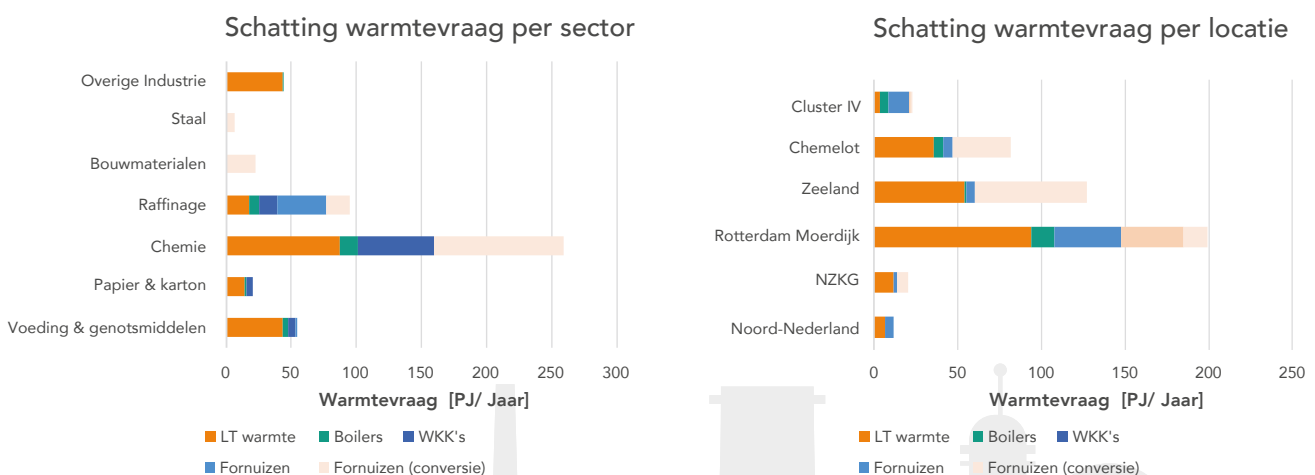
Uitgaande van de verkregen hoge temperatuur capaciteitsdata uit de LCP en MIDDEN databases, temperatuur regimes en sector verdeling kan uiteindelijk de totale warmtebehoefte van de industrie in kaart worden

gebracht, opgesplitst in lage temperatuur (< 200 °C) en hoge temperatuur (>200 °C) regimes. Het resultaat van de op bovenstaande wijze verkregen analyses wordt weergegeven in figuur B1.2. Uit de linker figuur kan opgemaakt worden dat van de 694 PJ jaarlijks finale industriële energiegebruik, volgens CBS ongeveer 20 procent wordt gebruikt in de vorm van elektriciteit. Daarnaast heeft 30 procent betrekking op lage temperatuur warmtegebruik (224 PJ) en 50 procent op hoge temperatuur warmtegebruik (~ 332 PJ). De lage temperatuur warmtevraag van 224 PJ is berekend op basis van de inschattingen uit tabel B1.2. De rechter figuur geeft een verdere verdeling van de CBS warmtevraag over de sectoren (onderverdeeld in lage temperatuur en hoge temperatuur warmte).



Figuur B1.2: verdeling van finaal energiegebruik in de Nederlandse industrie in 2018 naar elektriciteit en warmte (links) en warmtegebruik naar industrietak naar lage temperatuur en hoge temperatuur warmte (rechts).

Als op deze wijze de hoge temperatuur- en lage temperatuur warmte in kaart zijn gebracht ontstaat het gewenste beeld van warmtebehoefte per regime, sector, regio en installatie (figuur B1.3).



Figuur B1.3 Inschatting verdeling van lage en hoge temperatuur warmtegebruik in de Nederlandse industrie in 2018 naar sector en naar locatie.

De overall conclusie is dat deze aanpak bruikbaar is voor de kwantificatie en verdeling van de energievraag voor gehele Nederlandse industrie maar een 20 procent te hoog beeld geeft omdat het capaciteiten betreft en niet het actuele gebruik.

## Uitwerking van technisch potentieel voor elektrificatie

Als de onderverdeling van warmtegebruik naar apparaat, sector en locatie beschikbaar is, dan kan met kentallen (tabel B1.3) voor efficiëntie van traditionele warmtebronnen zoals gasboilers versus de (direct of indirect) geëlektrificeerde versie de finale behoefte aan elektriciteit of waterstof berekend worden per apparaat zoals boilers, fornuizen, WKK's etc.

Technisch gezien kan lage temperatuur warmtelevering al voor een significant deel geëlektrificeerd worden met reeds beschikbare warmtepomptechnieken. Temperaturen tot 200 °C worden rond 2030 met verdere ontwikkeling van industriële warmtepompen haalbaar geacht (ECN, 2018). Voor alle lage temperatuur warmtevraag wordt daarom in de inschatting van (directe) elektrificatie potentieel uitgegaan van inzet van warmtepompen met een zgn. *Coefficient of Performance* (COP) van 4.

Stoom van hogere temperaturen dan 200 °C die wordt geleverd door boilers en WKK installaties kan al deels worden geproduceerd met directe elektrificatie door plaatsing van elektrische boilers tot temperaturen van 300 °C. Het temperatuurbereik van hybride boilers loopt volgens recente informatie zelfs al op tot 500 °C (RH DHV, 2020). Op langere termijn zullen ook naar verwachting meer elektrische fornuizen en/of hot-oil systemen beschikbaar komen met een hoger temperatuurbereik. Voor specifieke grootschalige toepassingen, zoals elektrisch kraken en elektrolytische processen in de staalproductie, verkeren de technologieën echter nog in de R&D fase en zullen mogelijk pas ná 2030 een significante rol gaan spelen.

Voor de omrekening van de elektriciteitsbehoefte vanuit de beschikbare data voor de installaties worden de volgende kentallen gebruikt.

	Thermische efficiëntie	Bron
Conventionele boiler	85%	Typische industrie waarde moderne boiler
WKK - warmte	55%	Typische waarde voor een raffinaderij WKK
Waterstof boiler	90%	<a href="https://energy.nl/wp-content/uploads/2020/09/H2IndustrialBoiler_28092020_upd.pdf">https://energy.nl/wp-content/uploads/2020/09/H2IndustrialBoiler_28092020_upd.pdf</a>
Waterstof fornuis	90%	<a href="https://vnpi.nl/wp-content/uploads/2018/11/Eindrapport-VNPI-CO2-reductie-roadmap-Nederlandse-raffinaderijen.pdf">https://vnpi.nl/wp-content/uploads/2018/11/Eindrapport-VNPI-CO2-reductie-roadmap-Nederlandse-raffinaderijen.pdf</a>
Conventioneel fornuis	90%	link
Elektrisch fornuis	90%	<a href="https://vnpi.nl/wp-content/uploads/2018/11/Eindrapport-VNPI-CO2-reductie-roadmap-Nederlandse-raffinaderijen.pdf">https://vnpi.nl/wp-content/uploads/2018/11/Eindrapport-VNPI-CO2-reductie-roadmap-Nederlandse-raffinaderijen.pdf</a>
Elektrische boiler	99%	<a href="https://blueterra.nl/wp-content/uploads/2018/03/Electrification-in-the-Dutch-process-industry-final-report.pdf">https://blueterra.nl/wp-content/uploads/2018/03/Electrification-in-the-Dutch-process-industry-final-report.pdf</a>
Elektrische compressor	96%	aanname
Conventioneel stoom kraak fornuis	93,5%	Ullmann Encyclopedia
Elektrisch stoomkraak fornuis	98,5%	Aanname, omdat schoorsteenverliezen niet meer plaatsvinden
Waterstof uit elektrolyse	55 kWh/kg H <sub>2</sub>	20180514 Roadmap Hydrogen TKI Nieuw Gas May 2018. pdf (topsectorenergie.nl)
In het geval van CCS:		
CCS capture systeem	3,5 GJ/t CO <sub>2</sub> captured	Diverse onderzoeken
Elektriciteitsbehoefte	110 kWh/t CO <sub>2</sub>	TNO berekeningen inclusief CCS compressie

Tabel B1.3: Gebruikte efficiëntie kentallen voor inschatting van elektrificatiepotentieel

In alle analyses blijkt dat een belangrijke consequentie van elektrificatie het overblijven van restgassen is. Deze komen in significante hoeveelheden vrij (ter illustratie: bij raffinaderijen en ethyleenkrakers dekt deze stroom

tussen de 40-80 procent van de totale energiebehoefte). Ook in de industriële gasproductie (SMR tailgas), staalproductie (cokesgas, hoogoven gas), en kunstmestproductie gaat het om vergelijkbare percentages die worden aangewend als brandstof. Als deze warmteopwekking met elektriciteit gaat plaatsvinden is een andere toepassing voor deze gassen nodig. Vaak zijn deze gassen qua samenstelling niet eenvoudig geschikt voor andere toepassingen dan verbranding voor warmteopwekking.

Voor zover de processen waarbij de gassen ontstaan in de toekomst blijven bestaan, wordt verondersteld dat de restgassen moeten worden opgewerkt tot grondstof. Voor een dergelijke opwerking vindt al onderzoek plaats, bijvoorbeeld in de staalindustrie en raffinage. Dergelijke routes via synthesegas naar synthetische brandstoffen en/of methanol zijn op dit moment nog in ontwikkeling en relatief duur. Daarom wordt in deze analyse gekozen voor de reeds in gebruik zijnde opwerking van vrijkomende restgassen tot waterstof, CO<sub>2</sub> en neutrale componenten zoals stikstof. Voor deze opwerking is eveneens energie nodig, die in de analyse meegenomen is door een ingeschatte hoeveelheid elektriciteit of waterstof. De resterende CO<sub>2</sub> wordt afgevangen en opgeslagen of toegepast in bestaande of nieuwe processen. De resulterende (blauwe) waterstof wordt vervolgens voor ondervuring of als grondstof aangewend en verdringt dus de mogelijke toepassing van elektriciteit of groene waterstof.

In de volgende paragrafen worden twee varianten van elektrificatie uitgewerkt. In de directe-variant wordt zoveel mogelijk en waar realistisch mogelijk extern geproduceerde elektriciteit ingezet, in de indirecte-variant wordt zoveel mogelijk extern geproduceerde groene waterstof ingezet. De elektriciteit om deze groene waterstof te produceren wordt apart berekend. De hierboven beschreven verwerking van vrijkomende restgassen tot waterstof heeft in beide routes voorrang op de leveringen van groene waterstof.

## Technisch potentieel maximale directe elektrificatie

In deze route wordt de benodigde lage temperatuur warmte ingevuld door warmtepompen met een COP van 4. Tevens worden de (inefficiënte) stoom-gedreven apparaten geëlektrificeerd. In deze analyse wordt waterstof voor industrieel gebruik als grondstof nog steeds via de traditionele fossiele routes (SMR's) opgewekt, maar met een energie voorziening die geëlektrificeerd is. De eerder genoemde beschikbaar komende restgassen worden in deze analyse omgezet in (blauwe) waterstof en vervolgens ingezet. Dit gaat ten koste van een deel van het directe elektrificatiepotentieel.

Op basis van de verdiepende analyse van een aantal belangrijke sectoren wordt een genuanceerder beeld neergezet. Hieronder volgt een korte beschouwing voor deze sectoren.

Voor kraakprocessen bij petrochemie wordt verondersteld dat de kraakfornuizen (die nu op stookgassen branden) op termijn worden vervangen door elektrische fornuizen. Verder worden stoom-aangedreven compressoren vervangen door elektrische compressoren. Aangenomen wordt verder dat de gekraakte restgassen worden omgezet in waterstof en CO<sub>2</sub> (waarbij de CO<sub>2</sub> wordt afgevangen en opgeslagen). De waterstof wordt on-site gebruikt om stoom te produceren, terwijl de resterende benodigde stoom wordt geleverd door elektrische boilers. Een eventueel aanwezige WKK wordt uitgefaseerd, waarbij de wegvallende warmtelevering wordt vervangen door elektrische boilers en wegvallende elektriciteitsproductie wordt betrokken van het net.

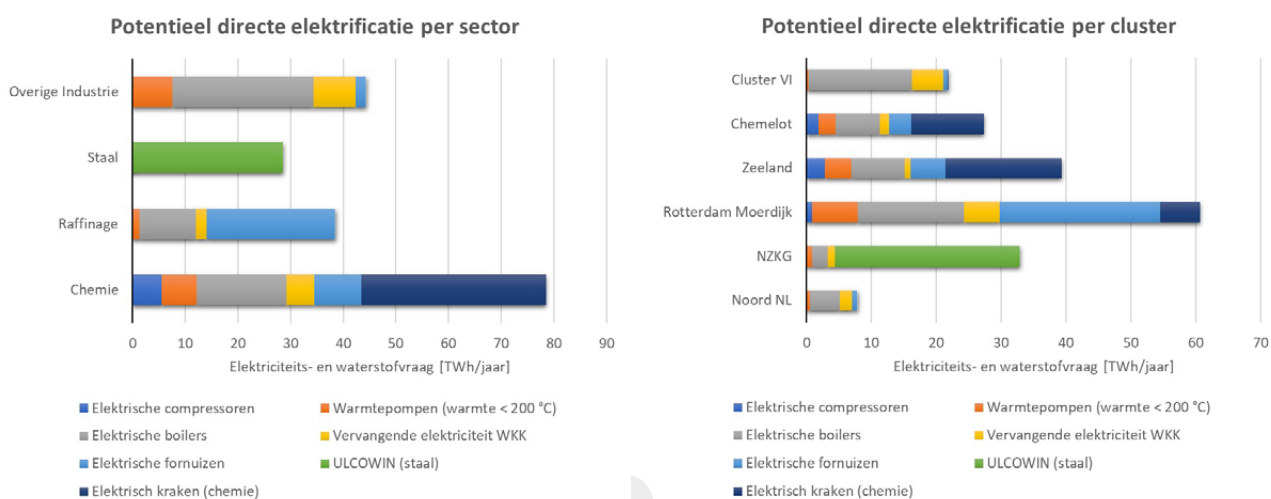
Voor industriële gassen en de ammoniakproductie wordt verondersteld dat de aardgasreformer fornuizen om waterstof te maken uit aardgas operationeel blijven worden, maar wel elektrisch worden verwarmd. Het vrijkomende restgas bevat veel stikstof (N<sub>2</sub>) en weinig methaan en kan niet voor herverwerking of verbranding worden gebruikt. De CO<sub>2</sub> wordt afgevangen en de bijbehorende energiebehoefte wordt meegenomen. Een deel van deze CO<sub>2</sub> is nodig in de productie van ureum uit NH<sub>3</sub> en CO<sub>2</sub>. Een eventueel aanwezige WKK wordt afgezet en de warmteproductie hiervan en van de andere conventionele boilers wordt vervangen door elektrische boilers. De wegvallende elektriciteitsproductie wordt geïmporteerd van het net.

In geval van raffinage gaat deze uitwerking uit van het vervangen van de huidige gasgestookte boilers en fornuizen door elektrische fornuizen, maar ook fornuizen op (blauwe) waterstof. De hierbij vrijgespeelde grote hoeveelheid stookgassen worden gebruikt voor de productie van blauwe waterstof met CO<sub>2</sub> afvang in SMR's of ATR's. Verder worden WKK's vervangen door elektrische boilers, en de huidige elektriciteitsproductie van de WKK's betrokken van het net. Aangezien moderne raffinaderijen sterk geïntegreerd zijn zullen deze aannames naar verwachting verre van optimaal zijn.

Voor de staalindustrie gaan we uit ontwikkeling van electrostaal processen. In het Ultra Low CO<sub>2</sub> Steelmaking (ULCOS) project van de Europese Unie zijn diverse alternatieven ontwikkeld voor de huidige CO<sub>2</sub>-intensieve processen. Eén daarvan is ULCOWIN, een proces waarin ijzererts elektrochemisch wordt gereduceerd tot ijzer. Het geproduceerde ijzer wordt verder verwerkt in een vlamboogoven. Dit wordt als een kansrijke technologie gezien die mogelijk vanaf 2040 kan worden toegepast.

Voor de overige sectoren wordt verondersteld dat gasboilers en WKK's worden vervangen door elektrische boilers (inclusief correctie voor het wegvallen van de elektriciteitsproductie), en dat ook ovens en andere verwarmingsinstallaties op termijn kunnen worden geëlektrificeerd.

Het resultaat voor deze uitwerking van directe elektrificatie wordt weergegeven in figuur B1.4, met aan de linkerkzijde de resultante finale elektriciteitsvraag naar sector, en rechts de elektriciteitsvraag naar cluster. De totale aanvullende elektriciteitsvraag bij directe elektrificatie van de Nederlandse industrie komt voor dit potentieel voor 2020 op basis van capaciteit uit op 190 TWh op jaarbasis, waarbij wordt opgemerkt dat de benodigde waterstof in Nederland nog steeds vanuit fossiele bronnen met CO<sub>2</sub> afvang wordt opgewekt. Dit getal is gebaseerd op capaciteit in plaats van daadwerkelijk gebruik en een aantal aannames. Het ligt ruim 20 procent hoger dan de CBS getallen voor 2018. Op vollast basis betekent dit een vermogen van maar liefst 21,7 GW. Deze 190 TWh is dus volledig ingezet voor verwarmingsdoeleinden en niet voor waterstof als grondstof. Ter referentie, de huidige totale Nederlandse elektriciteitsvraag bedraagt 120 TWh.



*Figuur B1.4: Potentieelschatting voor directe elektrificatie van de huidige energievraag in de Nederlandse industrie, per sector (links) en per cluster (rechts). Verder wordt de elektriciteitsbehoefte weergegeven naar type installatie.*

## Technisch potentieel maximale indirecte elektrificatie

In de indirecte elektrificatie route wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van groene waterstof voor industriële warmtetoepassingen. Er is een restant elektriciteit verondersteld ter vervanging van WKK's en inzet van warmtepompen waar mogelijk.

Waterstof kan ingezet worden in boilers en eventueel WKK-installaties (niet meegenomen in de beschouwing), al vergt dit nog verdere technische ontwikkeling van de branders en stikstof uitstoot (zie bijvoorbeeld (DNV GL, 2018), en (TKI nieuw gas, 2018)). Op langere termijn zullen naar verwachting ook waterstof fornuizen beschikbaar komen (zie ook (ECN, 2018)). Voor de eerder genoemde grootschalige toepassingen met hoge temperaturen, zoals stoomkraken, wordt dergelijke ontwikkeling ook voorzien, terwijl voor staalproductie gewerkt wordt aan *direct reduction* technieken op basis van waterstof met als doel fossielvrije staalproductie te realiseren voor 2035 (zie ook (HYBRIT, 2018)).

In de uitwerking van de kraakprocessen in de organische chemie wordt verondersteld dat waterstof wordt gebruikt als brandstof voor de kraakfornuizen en voor stoomproductie in boilers. De restgassen uit de krakers worden gebruikt om blauwe waterstof te produceren. Verder wordt alle stoom opgewekt uit huidige boilers en WKK's vervangen door stoom uit waterstof-boilers en wordt de verloren elektriciteit geleverd vanuit het net. De benodigde waterstof voor grondstof en brandstof wordt geleverd als groene waterstof.

In geval van productie van industriële gassen wordt aangenomen dat alle waterstofproductie uit de SMR's van deze sites wordt vervangen door groene waterstofaanvoer. De WKK-stoomproductie wordt vervangen door waterstofketels en de wegvallende elektriciteit wordt geleverd door het net.

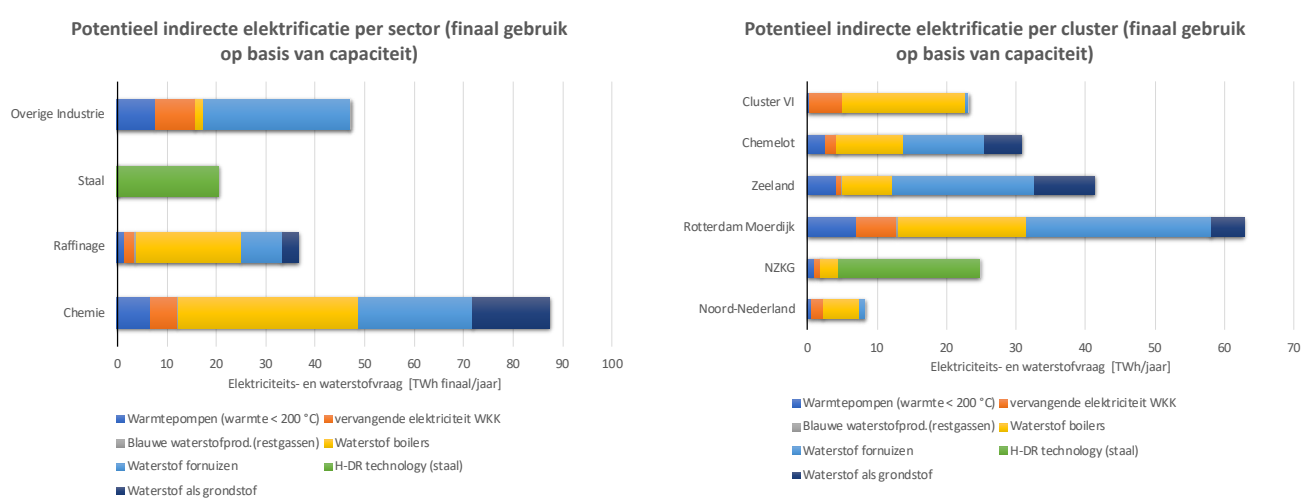
Hoewel de benodigde CO<sub>2</sub> voor productie van ureum ook via blauwe H<sub>2</sub> kan komen, wordt voor de kunstmest industrie in deze analyse de benodigde proces-waterstof deels nog opgewekt via een reformer met CCS uit fossiele grondstof om de minimumbehoefte aan CO<sub>2</sub> voor ureumproductie te halen. De impact op het hele plaatje is relatief laag. Daarnaast zal additioneel benodigde groene waterstof worden aangevoerd voor gebruik als grondstof voor de ammoniakproductie en als brandstof voor de stoomvoorziening met waterstofboilers ter plaatse. Wegvallende elektriciteitsproductie uit WKK vermogen wordt geleverd door het net. Naar verwachting stijgt de stoombehoefte van deze sector omdat de stoomproductie uit de SMR's zal verminderen. Deze stoom wordt onder andere gebruikt in de ureum fabriek. De afgeschatte hoeveelheid additionele stoom zal worden opgewekt door waterstof boilers.

In geval van raffinage en petrochemie wordt waterstof gebruikt als brandstof voor de ovens en voor stoomproductie met waterstofketels. De restgassen worden gebruikt om blauwe waterstof te produceren. Verder wordt WKK vervangen door waterstofboilers, en de huidige elektriciteitsproductie van de WKK betrokken van het net.

Voor de staalindustrie gaan we uit van hydrogen direct reduction (H-DR); ijzererts wordt hierbij gereduceerd tot ijzer door waterstof te gebruiken in plaats van koolstof. Dit levert in het proces waterdamp op in plaats van CO<sub>2</sub>-rijk hoogovengas.

Voor de overige sectoren wordt verondersteld dat gasboilers en WKK worden vervangen door waterstofboilers (inclusief correctie voor het wegvallen van de elektriciteitsproductie), en dat waterstoffornuizen worden toegepast ter vervanging van de bestaande fornuizen.

Het resultaat voor deze uitwerkingen wordt weergegeven in figuur B1.5 met de finale elektriciteitsvraag ingedeeld naar sector aan de linkerkant en naar cluster aan de rechterkant. Dit figuur laat dus zien hoeveel aanvullende elektriciteit en waterstof er op de industriële productielocaties (aan het hek) geleverd zal moeten worden. Ook in deze indirecte elektrificatieroute wordt een deel van de ingezette waterstof geproduceerd uit restgassen (blauwe waterstof) en wordt de rest als grondstof via elektrolyse opgewekt. De totale finale vraag naar energie voor de levering van warmte is sterk vergelijkbaar met directe elektrificatie en bedraagt eveneens rond 190 TWh. Deze additionele vraag zou (bij volledige implementatie) opgeteld moeten worden bij de huidige landelijke elektriciteitsbehoefte van 120 TWh.



Figuur B1.5: Potentieelschatting voor indirecte elektrificatie van de huidige energievraag in de Nederlandse industrie, exclusief rendementsverliezen voor elektrolyse – optellend tot 190 TWh.

## Verdere details, algemene opmerkingen en aannames

Voor elektrificatie wordt uitgegaan van de huidige warmtebehoefte. Mogelijke nieuwe procesroutes en/of producten zoals e-fuels die via (directe) elektrochemie kunnen gaan verlopen worden hier niet beschouwd. Alle inschattingen voor warmtegebruik en elektrificatie daarvan zijn gebaseerd op huidig, gerapporteerd geïnstalleerd vermogen. Dus niet op basis van de gebruikte capaciteit. Daarnaast wordt uitgegaan van 24/7 operatie en dus 8760 uur/jaar. Verder is het ingeschatte warmtegebruik gesplitst in < 200 °C (lage temperatuur) en >200 °C (hoge temperatuur).

Wanneer de lage temperatuur en hoge temperatuur behoefte per sector is vastgesteld is het voor de geografische spreiding van de behoefte van belang om in te schatten hoe de verdeling van de warmtebehoefte per regio ligt. Hiervoor is gebruik gemaakt van de Europese Large Combustion Plant (LCP) database uit 2018. Deze betreft de hoge temperatuur warmtegeneratie en dekt meer dan 90 procent van de hoge temperatuur warmte af. Het restant betreft kleinere installaties en hiervoor is dezelfde geografische spreiding aangenomen. De LCP database geeft het volgende beeld – waarbij allereerst via typische karakteristieken per apparaat de primaire warmte is omgerekend naar finale warmte.



Regio	% van de totale hoge temperatuur warmte behoefte
Botlek	8%
Chemelot	17%
Europoort	9%
Noordzee Kanaalgebied	6%
Moerdijk	7%
Maasvlakte	1%
Pernis	22%
Zeeland	26%
Noord-Nederland	3%
Overige locaties	2%

Als per regio de hoge temperatuur warmtebehoefte in kaart is gebracht (en genormaliseerd naar het totale CBS getal), dan kan hiermee tevens de regionale lage temperatuur behoefte worden ingeschat. Daarnaast geeft het LCP informatie over het type apparaat, wat weer van belang is voor de inschatting van de elektriciteitsbehoefte bij de diverse vormen van elektrificatie.

De LCP data (2018) werden gebruikt om uitgaande van de te elektrificeren warmtebehoefte de elektriciteitsbehoefte te kwantificeren op basis van het type LCP apparaat (WKK, stoomketel, fornuis). Hierbij zijn de volgende algemene aannames gedaan voor directe elektrificatie:

- Vervang de bestaande fornuizen door elektrische fornuizen
- Vervang de stoomproductie van stilgezette WKK's en stoomketels door elektrische boilers
- Vervang de verloren elektriciteit vanuit de stilgezette WKK's door elektriciteit uit het netwerk

Voor het geval van maximale indirecte elektrificatie zijn de aannames als volgt:

- Vervang de bestaande fornuizen door waterstof-gestookte fornuizen
- Vervang de bestaande stoomproductie uit stoomketels en stilgezette WKK's door waterstofboilers
- Vervang de gedorven elektriciteit uit de WKK's door elektriciteit uit het grid.
- De benodigde groene waterstof wordt opgewekt uit elektriciteit met een elektrische efficiëntie van 55 kWh/kg H<sub>2</sub> (extracted from 20180514 Roadmap Hydrogen TKI Nieuw Gas May 2018.pdf (topsectorenergie.nl))

## Elektrificatie van de kunstmestsector (data uit het betreffende midden rapport)

Het betreft hier OCI Nitrogen (Chemelot) en Yara Sluiskil B.V. (Zeeland). Voor zowel het directe- als het indirecte elektrificatiescenario geldt de volgende beschouwing:

- De chemische behoefte aan waterstof is 0.178 t H<sub>2</sub>/t NH<sub>3</sub>. Deze wordt in beide elektrificatieroutes (deels) geproduceerd uit fossiele grondstoffen. Ook in de waterstof route zal er echter nog steeds een minimaal noodzakelijke fossiele productie plaatsvinden om voldoende CO<sub>2</sub> voor Ureum-productie te maken, aangevuld met geïmporteerde (groene) waterstof.
- De totale proces CO<sub>2</sub> emissies van de ammonia productie betreft 1,9 t CO<sub>2</sub>/ t NH<sub>3</sub>
- CO<sub>2</sub> emissies uit verbrandingsprocessen in de ammonia productie liggen op 0,9 t CO<sub>2</sub>/ t NH<sub>3</sub>

- De CO<sub>2</sub> emissies uit de benodigde waterstoffabrieken (SMRs) liggen op 1,3 t CO<sub>2</sub>/t NH<sub>3</sub>
- De energiebehoefte (capaciteit) voor de gebruikte SMRs en boilers/WKKs komen uit de LCP database.
- De OCI site in Chemelot, betreft stoom van buiten de site (Swentibold power plant) - deze wordt meegenomen in de stoomkraker evaluatie en dus niet in de kunstmest evaluatie.

Om voor deze sector de elektriciteitsbehoefte onder maximale directe elektrificatie in te schatten zijn de volgende aannames gedaan:

- Waterstof voor ammoniaproductie wordt nog steeds geproduceerd uit fossiele grondstoffen (aardgas) - voor de productie van ureum uit ammoniak is namelijk ook CO<sub>2</sub> nodig. De warmte benodigd via de fornuizen voor de waterstofproductie wordt echter wèl elektrisch opgewekt.
- Het bij de productie van waterstof vrijkomende restgas (nu in gebruik als stookgas) wordt gezien als bijproduct dat niet kan worden teruggevoerd in de reformer vanwege het hoge stikstof gehalte (14 procent methaan en de rest N<sub>2</sub>). ( 2017-03 Techno-Economic Evaluation of Hyco Plant Integrated to Ammonia / Urea or Methanol Production with CCS (ieaghg.org)
- De stoom die werd geproduceerd via de boilers en de WKKs wordt geleverd door elektrische boilers.
- De verloren elektriciteit uit de stilgezette WKK's wordt betrokken uit het grid.
- De stoom opgewekt via utilities en de reformers in de kunstmestsector is hoge temperatuur warmte.

Voor de maximale indirecte elektrificatie zijn de volgende aannames gedaan:

- Waterstof wordt in dit geval zowel gebruikt als grondstof voor ammoniak productie als brandstof.
- De benodigde proces-waterstof wordt deels nog steeds opgewekt via een reformer met CCS uit fossiele grondstof. Dit is nodig om de minimumbehoefte aan CO<sub>2</sub> voor ureumproductie te halen. De additionele waterstof wordt geïmporteerd. De consumptie van CO<sub>2</sub> per ton urea ligt rond de 730-750 kg.
- Naar verwachting stijgt de stoombehoefte van deze sector omdat de stoomproductie uit de SMR's zal verminderen. Deze stoom wordt gebruikt in de ureumfabriek. De hoeveelheid additionele stoom wordt afgeschat aan de hand van de typische verhouding voor stoomproductie van 0,022 PJ/ktH<sub>2</sub>. Deze stoom zal worden opgewekt door waterstof boilers.
- Alle overblijvende waterstofbehoefte (als grondstof en stookgas) wordt geleverd via groene waterstof.

In de berekening van de elektriciteitsbehoefte in de vervanging van de geleverde warmte door bestaande apparaten worden de volgende kentallen gebruikt.

	Thermische efficiëntie	Bron
Conventionele boiler	85%	aanname
WKK	55%	aanname
Waterstof boiler	90%	link
Conventioneel fornuis	90%	link
Elektrisch fornuis	99%	aanname
Elektrische boiler	99%	link
CCS capture systeem	GWh/Mton CO <sub>2</sub> captured	
Elektriciteitsbehoefte	80	aanname

## Elektrificatie van stoomkrakers

Het betreft hier de sites van Shell in Moerdijk, Dow in Zeeland and SABIC in Chemelot, waarbij de ethyleen capaciteiten zijn gerapporteerd in Petrochemicals Europe.

- De naphtha capaciteit werd ingeschat op basis van typische kentallen voor een ethyleen opbrengst van 28,5%wt (JRC Best available technique report for LVOC)
- Thermische capaciteiten voor fornuizen en boilers/WKKs komen uit de LCP database (2018), waar nodig aangevuld met berekeningen.
- Downstream processen zoals bij Shell Moerdijk: de propyleenoxide en ethyleenoxide units gebruiken stookgassen en stoom, welke zijn gekarakteriseerd uit beschikbare MIDDEN rapporten uit 2020. Hetzelfde geldt voor de SABIC site waar benzeen extractie, butadien en MTBE units aanwezig zijn. Voor het Dow complex zijn de downstream units niet beschikbaar in de MIDDEN database en is alleen het kraak-complex (pyrolyse-compressie-fractionatie) meegenomen in de evaluatie.
- Informatie over verdere apparaten bij Shell Moerdijk en Sabic Chemelot (utilities, boilers en gasturbines) komt uit de LCP database.
- In beide gevallen is het bijproduct (stookgas) in het geval van elektrificatie niet meer beschikbaar voor verbranding. Er wordt aangenomen dat hiermee blauwe waterstof wordt geproduceerd (SMR+CCS). De ingeschatte productie van blauwe waterstof komt uit (ieaghg.org) is tevens gebaseerd op een typische stookgas productie uit de krakers van 13.5% wt (BAT JRC report (2017)).

Aannames onderliggend aan maximale directe elektrificatie

- Gasgestookte stoomkraker fornuizen worden vervangen door elektrische fornuizen en ook grondstof voorverwarming vindt plaats via elektrische boilers.
- Alle stoomgedreven compressoren worden vervangen door elektrische compressoren.
- De warmte gebruikt in stoomgedreven compressoren en in de fractionatie sectie ligt naar verwachting tussen 15-20 procent van de totale energiebehoefte van de krakers. Ren et al (2009)
- Voor de fractionatie sectie wordt om de warmtebehoefte uit te rekenen een thermische efficiëntie aangenomen van 80 procent
- Elke vorm van warmteterugwinning uit de koeling van de productgassen wordt intern gebruikt om de warmtebehoefte van fractionatie en downstream processen te dekken – aangevuld met elektrische boilers
- Blauwe waterstof uit het stookgas komt beschikbaar voor export.

In het geval van maximale indirecte elektrificatie via waterstof geldt de volgende aanpak:

- Waterstof wordt gebruikt als brandstof voor fornuizen en boilers.
- Alle stoom opgewekt uit huidige boilers en WKK's wordt vervangen door stoom uit waterstof-boilers.
- De benodigde waterstof voor grondstof en brandstof wordt geleverd als groene waterstof opgewekt uit elektriciteit met een efficiëntie van 55 kWh/kg H<sub>2</sub> (20180514 Roadmap Hydrogen TKI Nieuw Gas May 2018.pdf (topsectorenergie.nl))

In de berekening van de elektriciteitsbehoefte in de vervanging van de geleverde warmte door bestaande apparaten worden de volgende kentallen gebruikt.

	Thermische efficiëntie	Bron
Conventioneel fornuis	93,5%	Ullmansencyclopedia
Elektrisch fornuis	98,5%	Aanname omdatschoorsteenverliezen niet meerplaatsvinden
Conventionele boiler	85%	aanname
WKK-warmte	55%	aanname
Elektrische boiler	99%	link
Elektrische compressor	96%	aanname
CCS capture system	GWh/Mton CO <sub>2</sub> captured	
Elektriciteitsbehoefte	80	aanname

## Elektrificatie van raffinaderijen

De raffinaderijsector in Nederland wordt beschreven in een toegewijd MIDDEN rapport. De grootste locaties zijn Shell Pernis, BP Europoort, Esso Botlek, Gunvor Botlek en Zeeland Refinery. De gasgestookte fornuizen komen uit voornoemd MIDDEN rapport en zijn aangevuld met publieke milieu-effect-rapportages en openbare vergunningen. De inschatting van capaciteiten van boilers en WKK's komen uit de LCP database (2018)

In het geval van maximale directe elektrificatie zijn de volgende stappen gezet:

- Alle gasgestookte fornuizen worden vervangen door elektrische fornuizen.
- De vrijkomende stookgassen worden omgezet tot blauwe waterstof. In de kwantificatie is gemakshalve uitgegaan van methaan als proxy voor de compositie. De inschatting van de waterstofproductie komt uit 2017-02.pdf (ieaghg.org)
- De stoomproductie uit conventionele boilers en WKK's wordt vervangen door elektrische boilers. Aangezien raffinaderijen over de jaren hun energiesysteem hebben geoptimaliseerd is deze aanname waarschijnlijk vrij onnauwkeurig en kan het de elektriciteitsbehoefte enigszins overschatten
- De elektriciteit uit WKK's wordt vervangen door levering vanuit het grid.

In het geval van maximale indirecte elektrificatie worden de volgende veranderingen doorgevoerd:

- Waterstof wordt ingezet als brandstof voor de fornuizen
- Stoom uit conventionele boilers en WKKs wordt vervangen door elektrische boilers.
- De vrijkomende stookgassen worden verwerkt tot blauwe waterstof
- Alle additionele waterstof (bovenop de blauwe waterstof) wordt als groene waterstof ingevoerd. Deze wordt opgewekt via elektrolyse met een efficiëntie van 55 kWh/kg H<sub>2</sub> (20180514 Roadmap Hydrogen TKI Nieuw Gas May 2018.pdf (topsectorenergie.nl))

In de berekening van van de elektriciteitsbehoefte in de vervanging van de geleverde warmte door bestaande apparaten worden de volgende kentallen gebruikt.

	Thermische efficiëntie	Bron
Conventioneel fornuis	90%	link
Elektrisch fornuis	99%	aanname
Conventionele boiler	85%	aanname
WKK-warmte	55%	aanname
Elektrische boiler	99%	link
CCS capture systeem	GWh/Mton CO <sub>2</sub> captured	
Elektriciteitsbehoefte	80	aanname

## Elektrificatie van de staal-industrie

In Nederland betreft dit TataSteel, maar is er tevens een duidelijke link mogelijk met Zeeland en ArcelorMittal. Conventioneel staal wordt geproduceerd door ijzererts te reduceren tot elementair ijzer met behulp van koolstof. Hierbij komen in het eigenlijke proces grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> vrij, naast CO<sub>2</sub> die samenhangt met de warmte-opwekking. De benodigde informatie betreffende TATA steel en de toepasselijke technologie-opties komen uit het MIDDEN rapport (2019).

Voor de case van maximale directe elektrificatie wordt als voornaamste optie de ULCOWIN technologie gezien. In deze technologie wordt ijzer gewonnen door elektrolyse. De benodigde hoeveelheid elektriciteit komt uit het betreffende MIDDEN-rapport.

In het geval van maximale indirecte elektrificatie worden de volgende stappen voorzien:

- Als technologie wordt H-DR (hydrogen direct reduction) staalproductie genomen.
- De in het proces vrijkomende rest-gassen worden gebruikt voor blauwe waterstof
- De resterende waterstofvraag wordt gedekt door groene waterstof die wordt opgewekt door elektrolyse met een efficiëntie van 55 kWh/kg H<sub>2</sub> 20180514 Roadmap Hydrogen TKI Nieuw Gas May 2018.pdf (topsectorenergie.nl)

## Elektrificatie van industriële gassen

De informatie over waterstofproductie en inzet van WKK's van belang voor de industriële gasindustrie is verzameld uit het MIDDEN rapport over deze sector.

In het geval van maximale directe elektrificatie zijn de volgende stappen genomen:

- Alle huidige waterstofproductie van deze sites wordt verzorgd in de vorm van blauwe waterstof. De benodigde elektriciteit voor het CO<sub>2</sub> capture proces wordt meegenomen in de evaluatie.
- Het geproduceerde rest-gas van de SMR's wordt gebruikt om een deel van de voor de waterstofproductie benodigde warmte te verzorgen in de fornuizen, met daarbij behorende CO<sub>2</sub> capture. De resterende warmtebehoefte voor de SMRs wordt verzorgd via elektrische verwarming.
- De huidige stoom productie via WKK's wordt vervangen door waterstof-boilers en de gedorven WKK elektriciteit wordt betrokken van de grid.

In het geval van maximale indirecte elektrificatie zal het volgende gebeuren:

- Alle waterstof nu nog geproduceerd vanuit de SMRs zal worden vervangen door groene waterstof
- WKKs worden vervangen door waterstofboilers en elektriciteit vanuit het grid.
- Groene waterstof wordt opgewekt via elektrolyse met een efficiëntie van 55 kWh/kg H<sub>2</sub> (20180514 Roadmap Hydrogen TKI Nieuw Gas May 2018.pdf (topsectorenergie.nl))

In de berekening van van de elektriciteitsbehoefte in de vervanging van de geleverde warmte door bestaande apparaten worden de volgende kentallen gebruikt.

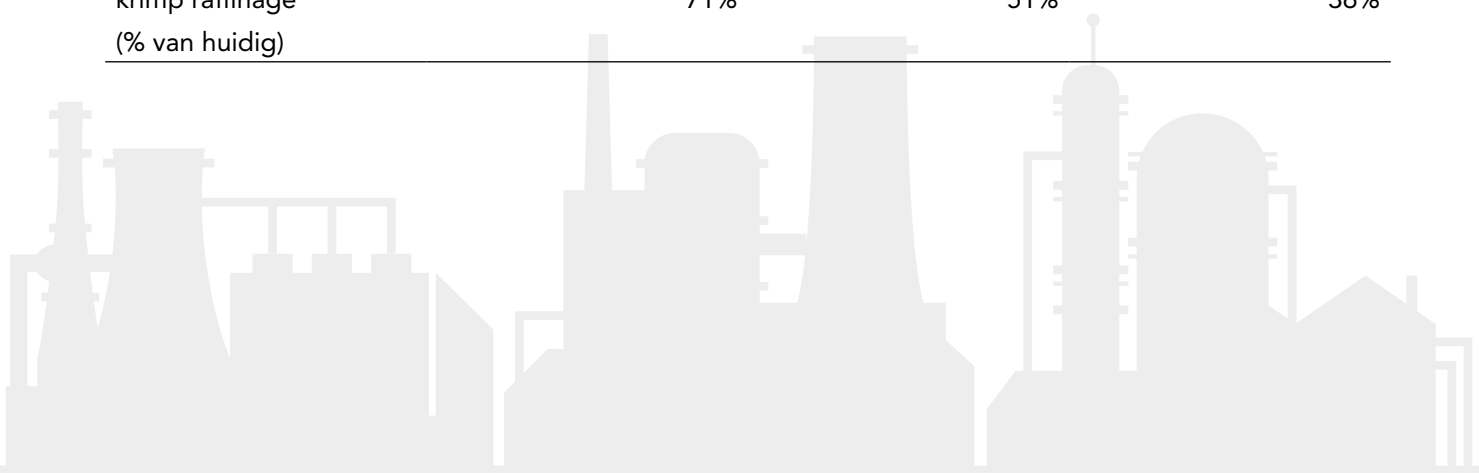
	Thermische efficiëntie	bron
Conventioneel fornuis	90%	link
Conventionele boiler	85%	aanname
Elektrisch fornuis	90%	aanname
WKK	55%	aanname
Waterstof boilers	90%	link
Waterstof fornuis	90%	link
Elektrische boiler	99%	link
CCS capture system	GWh/Mton CO <sub>2</sub> captured	
Elektriciteitsbehoefte	80,00	aanname

## Ontwikkelingen richting de toekomst

Bovenstaande inschattingen betreffen de maximale elektriciteit/waterstof behoefte. Voor 2030 is vervolgens aangenomen dat als gevolg van jaarlijkse efficiëntie verbeteringen van operaties en technologie de totale behoefte met 10 procent ten opzicht van 2021 afneemt-ondanks eventuele productiegroei. Voor 2040 en 2050 neemt dit verder toe tot 18 procent resp. 26 procent.

In navolging van prognoses voor het gebruik van motorbrandstoffen en ontwikkelingen in grondstoffen voor de petrochemie (inclusief recycling) wordt hier aangenomen dat de raffinage industrie krimpt. Het wordt aangenomen dat dit het sterkst merkbaar is in Zeeland en Rotterdam.

	2030	2040	2050
efficiëntie (% van huidig)	90%	82%	74%
rimp raffinage (% van huidig)	71%	51%	36%



## Relevante midden rapporten

- M. Batool and W. Wetzels (2019), Decarbonisation options for the Dutch fertiliser industry, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency & ECN part of TNO, The Hague.
- Keys. A, van Hout. M, Daniëls. B (2019), Decarbonisation options for the Dutch Steel Industry. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency & ECN part of TNO, The Hague.
- Wong, L., and Van Dril, A.W.N. (2020), Decarbonisation options for large volume organic chemicals production, Shell Moerdijk. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO EnergieTransitie, The Hague.
- C. Oliveira and K.M. Schure (2020), Decarbonisation options for the Dutch refinery sector. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO Energy Transition, The Hague.
- M. Cioli, K.M. Schure and D. van Dam (2021). Decarbonisation options for the production of industrial gases. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO Energy Transition, The Hague

## Literatuur

Davidse Consultancy. (2012). *Warmte-energie, de motor van de industrie*. Bennekom: Davidse Consultancy.

DNV GL. (2018). *Verkenning naar mogelijkheden om aardgas te vervangen in industriële verhittingsprocessen*. Arnhem: DNV GL.

ECN. (2018). *A first order roadmap for Electrification of the Dutch Industry*. Petten: ECN.

ECN. (2018). *A first order roadmap for Electrification of the Dutch Industry*. Petten: ECN.

Ecoheatcool. (2005). *The EUropean heat market*. Brussels: Ecoheatcool and Euroheat & Power.

JRC. (2012). *Heat and cooling demand and market perspective*. Petten: JRC.

RH DHV. (2020). *Project 6-25 Technology Validation*. Amersfoort: RH DHV.

TKI nieuw gas. (2018). *Contouren van een Routekaart Waterstof*. Amersfoort: TKI nieuw gas.

