

Kernenergie voor onze toekomst

*Roadmap voor de rol van kernenergie
binnen een CO₂-vrije energievoorziening
in Nederland*

2^e (herziene) versie, februari 2017



NuclearNederland

www.nuclearnederland.nl

Inhoud

1	Inleiding	3
2	Nederlandse energievraag	5
3	Kernenergie	9
3.1	Algemeen	9
3.2	De nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland	10
3.3	Kernenergie en de vier energiefuncties	11
3.4	De bijdrage van kernenergie aan de reductie van emissies van broeikasgassen	11
4	Korte termijn regelbaar elektriciteitsvermogen met bewezen technologie	12
4.1	Bestaande capaciteit	12
4.2	Nucleaire nieuwbouw op korte termijn	12
5	Middellange termijn nucleaire warmtekracht voor de Nederlandse procesindustrie	14
5.1	Nucleaire warmtekracht voor de Nederlands industrie	14
6	Lange termijn regelbaar elektriciteitsvermogen en warmtekracht op basis van Generatie-IV reactortechnologie en een gesloten splijstofcyclus	16
6.1	Nucleair in duurzame energiemix voor de lange termijn	16
7	Conclusies	18
	Referenties	19

Lijst van acroniemen

AHTR	Advanced High Temperature Reactor, HTR gekoeld met fluoridezout	LFR	Lead-cooled Fast Reactor, loodgekoelde snelle reactor
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek	LWR	Lichtwaterreactor
CLO	Compendium voor de leefomgeving	MOX	Mixed-Oxide splijstof, een mengsel van uranium- en plutoniumdioxide
CO ₂	Koolstofdioxide, één van de meest voorkomende broeikasgassen	MSR	Molten Salt Reactor, gesmolten zout reactor
COL	Construction & Operating License	MWh	Megawattuur elektriciteit
COP	Conference of Parties van de Verenigde Naties	MWe	Megawatt elektrisch vermogen
DEI	Delft Energy Initiative	NRG	Nuclear Research and consultancy Group
FHR	Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor, HTR gekoeld met fluoridezout	PLO	Planbureau voor de Leefomgeving
HFR	Hoge Flux Reactor, onderzoeksreactor in Petten	PJ	PetaJoule, 10 ¹⁵ Joule, meestal gebruikt voor thermische energie (warmte)
HT(G)R	Hoge Temperatuur (Gasgekoelde) Reactor, HTR gekoeld met helium	ppm	Parts-per-million, één op de miljoen andere deeltjes
IAEA	International Atomic Energy Agency	TU Delft	Technische Universiteit Delft
IPCC	International Panel on Climate Change van de Verenigde Naties	NNL	Vereniging Nucleair Nederland
KCB	Kerncentrale Borssele	WANO	World Association of Nuclear Operators
kWh	Kilowattuur elektriciteit	WNA	World Nuclear Association

Inleiding



In het kader van de door het Ministerie van Economische Zaken gestarte energie dialoog heeft de Vereniging Nuclear Nederland (NNL) een roadmap voor kernenergie opgesteld. Met deze roadmap geeft de vereniging haar visie op de toekomstige rol van kernenergie binnen een CO₂-vrije energievoorziening in Nederland.

De noodzaak voor een CO₂-vrije energievoorziening komt voort uit de grootschalige inzet van fossiele brandstoffen, die in een tijdsbestek van slechts enkele eeuwen heeft bijgedragen aan een CO₂-concentratie in de atmosfeer van meer dan 400 ppm. Willen wij de nadelige effecten van de hoge CO₂-concentratie, zoals de verandering van het klimaat en de verzuring van de oceanen, beheersbaar houden, dan zal binnen enkele decennia de emissie van CO₂ zeer drastisch beperkt moeten worden. Gebaseerd op vele wetenschappelijke studies, heeft het International Panel on Climate Change (IPCC) geconcludeerd dat de netto CO₂-emissie in 2050, en daarmee feitelijk de productie van CO₂, vrijwel nihil moet zijn, wil de temperatuurstijging met redelijke waarschijnlijkheid tot 2°C worden beperkt. De Europese leiders besloten in reactie hierop tot een reductie van de CO₂-emissie met 80 tot 95% in 2050. Tijdens de COP21 conferentie in Parijs (COP, 2015) is de mondiale doelstelling verder aangescherpt met het streven naar maximaal 1,5 °C temperatuurstijging. Recente studies geven indicaties dat nog drastischere maatregelen noodzakelijk zijn (Roglj, 2016). In de recente studie van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL, 2016), wordt aangegeven dat kernenergie daarin een belangrijke rol kan spelen.

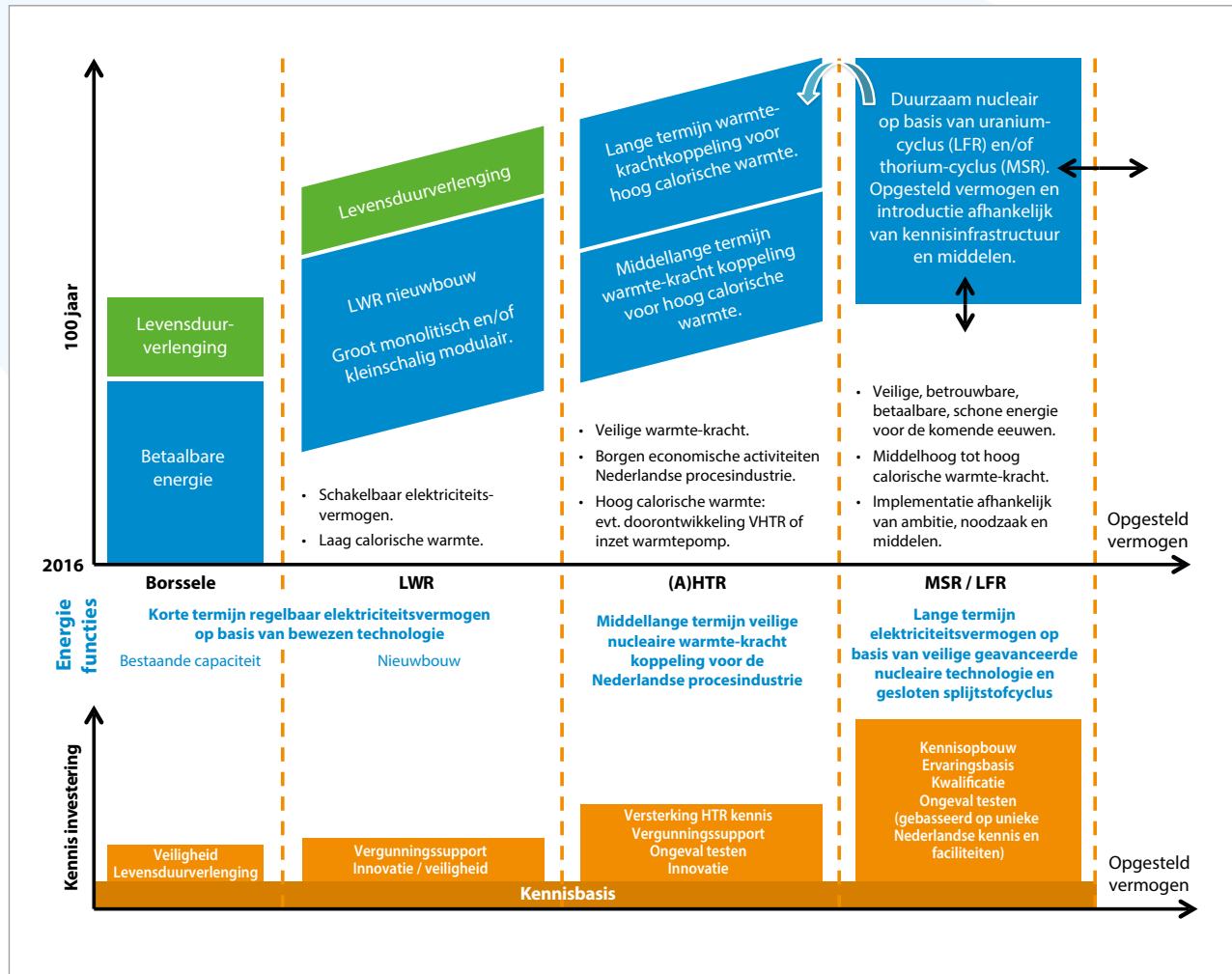
Deze roadmap beschrijft de mogelijke inzet van kernenergie in Nederland uitgesplitst naar de vier functionele categorieën van energie in onze samenleving. Dit is gedaan binnen de uitgangspunten van de toekomstige energiemix zoals neergelegd in het energierapport opgesteld door het Ministerie van Economische Zaken (EZ, 2016). Bovendien schetst de roadmap, in aanvulling op de inventarisatie van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland (NNL, 2016), de benodigde kennisinfrastructuur om die inzet van kernenergie te kunnen faciliteren.

Gegeven de 60-jarige bedrijfstijd van bestaande kerncentrales, het meerjarentraject voor de bouw van de actuele generatie nieuwe kerncentrales en de lange ontwikkeltijd van een nieuwe generatie kerncentrales strekt deze roadmap zich uit tot ver na 2050. Deze roadmap beschrijft de bijdragen van kernenergie op drie termijnen, gebaseerd op de huidige stand van de techniek en met een realistische inschatting van de ontwikkeltijd van nieuwe technologieën. Dit heeft geleid tot de volgende indeling:

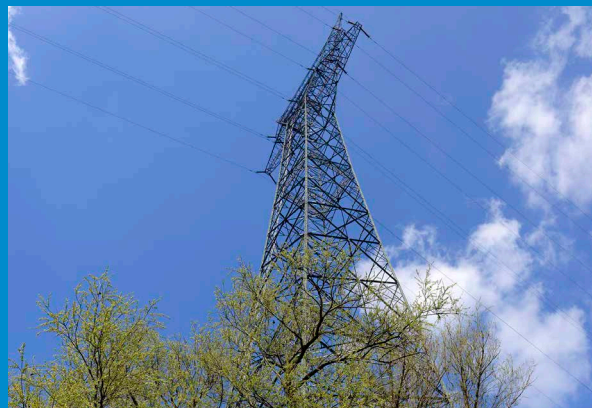
1. **Korte termijn**
Regelbaar elektriciteit op basis van geavanceerde Generatie-III lichtwaterreactoren (LWR).
2. **Middellange termijn**
Nucleaire warmtekracht gebaseerd op de hoge temperatuur reactortechnologie (HTR) van Generatie-III+.
3. **Lange termijn**
Regelbaar elektriciteitsvermogen en warmtekracht op basis van Generatie-IV technologie, excellerend op reactorveiligheid en duurzaamheid.

Figuur 1.1 vat de hierboven beschreven roadmap in het kort samen. Met de uitleg die volgt, is dit de nucleaire roadmap, zoals die door de Vereniging Nucleair Nederland is opgesteld.

Figuur 1.1 | Roadmap 'Nucleair' als onderdeel van de Nederlandse energiemix



Nederlandse energievraag



In navolging van het rapport van het RLI (2015) en het energierapport van het Ministerie van Economische Zaken (2016), zal in deze roadmap het Nederlandse energieverbruik worden uitgesplitst in vier functionele categorieën:

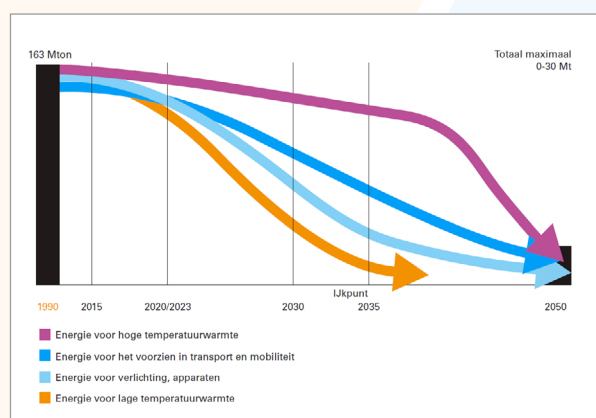
1. Elektriciteit
2. Transport
3. Lage temperatuur warmte (verwarming inclusief glastuinbouw)
4. Hoge temperatuur warmte (procesindustrie)

Voor alle functionaliteiten zal een transitie naar een CO₂-arme energievoorziening moeten worden ingezet willen de binnen de EU voor Nederland afgesproken doelstellingen kunnen worden behaald. De raad voor de leefomgeving en infrastructuur heeft in haar rapport "Rijk zonder CO₂" (RLI, 2015) de tijdspaden geschetst waarop deze transitie voor ieder van de functionali-

teiten eruit zou kunnen zien. Deze tijdspaden zijn een gevolg van korte termijn acties gericht op energiebesparing en verbeterde energie-efficiëntie, en de ontwikkeling van nieuwe technologieën voor daarna. Deze tijdspaden zijn weergegeven in Figuur 2.1.

De verschillende rekenwijzen en definities van bronnen en doelen van energiestromen maken het moeilijk om een consistente uitsplitsing van het totale energieverbruik te maken over de diverse functiecategorieën. In deze roadmap worden de verbruiksgegevens zoals aangegeven in Tabel 2.1 gehanteerd. Deze zijn voornamelijk gebaseerd op gegevens van het CBS (2015) en CE (2014). Opgemerkt wordt dat afhankelijk van de gehanteerde definities en omzettingen andere waarden gevonden kunnen worden. Zo wordt een gedeelte van het saldo energieomzetting van de elektriciteitsvoorziening nuttig gebruikt als warmte. Voor de roadmap speelt dit geen rol.

Figuur 2.1 | Hoofdlijnen van een mogelijke energietransitie naar een CO₂-arme energievoorziening in 2050 voor de vier functies van het Nederlandse energieverbruik



Tabel 2.1 | Het huidige Nederlands energieverbruik uitgesplitst naar de verschillende functiecategorieën (CBS, 2015 & CE, 2014). De nauwkeurigheid bedraagt circa 10%.

Funcie categorie	Energieverbruik (PJ=10 ¹⁵ J)
Elektriciteit	425 (=118 miljard kWh)
Saldo energieomzetting ^{*)}	575
Transport	550
Lage temperatuurwarmte	750
Hoge temperatuurwarmte	450
Totaal	2750

^{*)}Het saldo energieomzetting verdisconteert de verliezen tijdens de omzetting van warmte naar elektriciteit. Deze restwarmte kan gedeeltelijk worden benut.

Elektriciteit

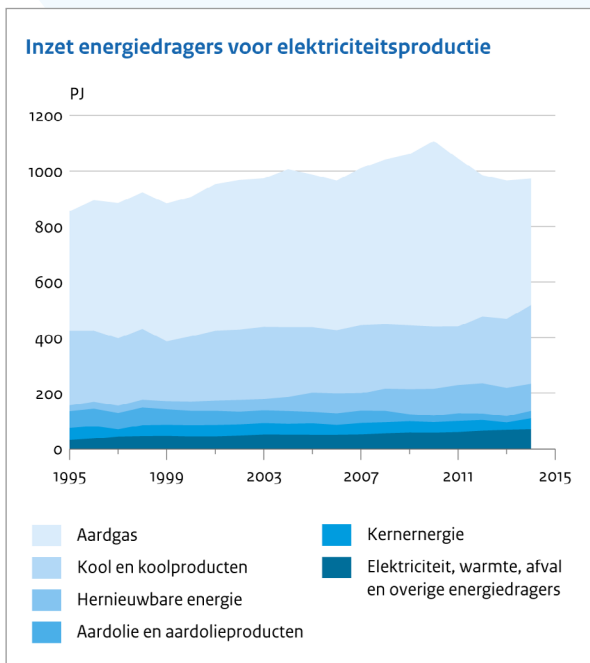
Het Nederlandse elektriciteitsverbruik bedroeg in 2015 circa 118 miljard kWh waarvan 110 miljard kWh in Nederland werd opgewekt (CBS, 2016). Hiertoe werden voornamelijk aardgas en steenkool (>80%) ingezet en in mindere mate hernieuwbare energie (10% biomassa, wind en zon). Het aandeel kernenergie bedroeg circa 4%.

Een historisch overzicht van de inzet van de verschillende energiedragers voor de productie van elektriciteit is gegeven in Figuur 2.2. Het elektriciteits-

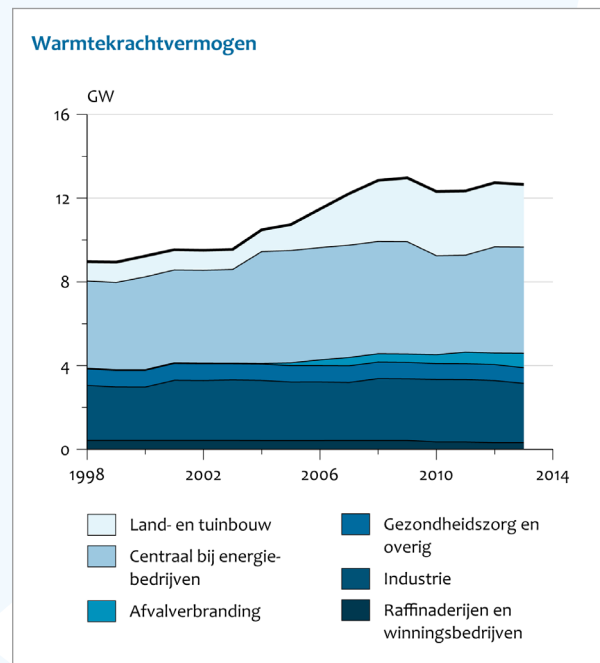
verbruik is in de afgelopen 50 jaar vrijwel continu gestegen, zie Figuur 2.3, maar vlakt sinds enkele jaren af. Het is niet geheel duidelijk of dit een trendbreuk betreft of slechts een stagnatie ten gevolge van de economische crisis.

Het aandeel verzorgd door gas wordt in belangrijke mate bepaald door de warmtekrachtinstallaties, die tevens voorzien in een belangrijk deel van de lage-temperatuur warmtevraag (zie Figuur 2.4). Warmtekrachtinstallaties wekten in 2013 circa 180 PJ aan elektriciteit op en 220 PJ aan warmte (CBS, 2015).

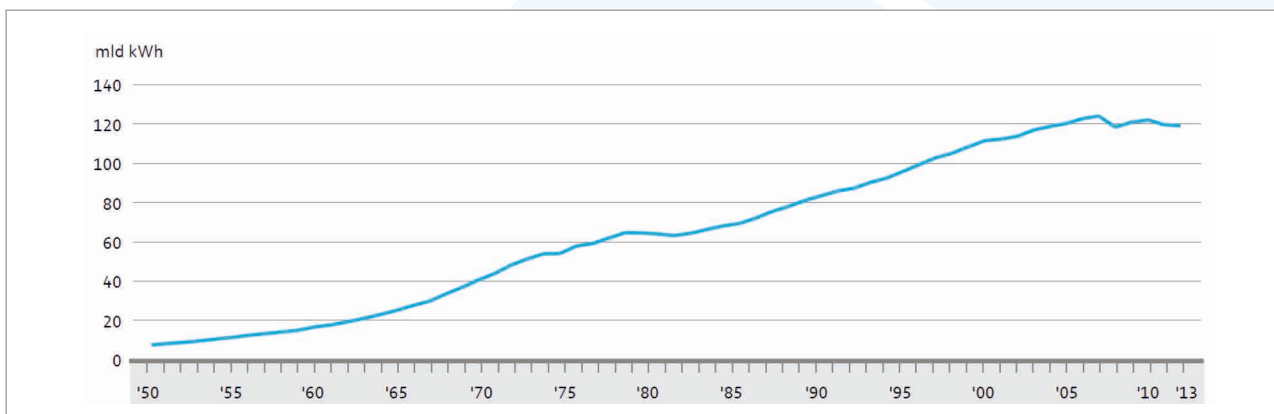
Figuur 2.2 | Historisch overzicht van de inzet van energiedragers voor de opwekking van elektriciteit in Nederland (CBS, 2016)



Figuur 2.4 | Het opgesteld elektrisch warmtekrachtvermogen in Nederland (CBS, 2015)



Figuur 2.3 | Elektriciteitsverbruik in Nederland sinds 1950 (CBS, 2015)

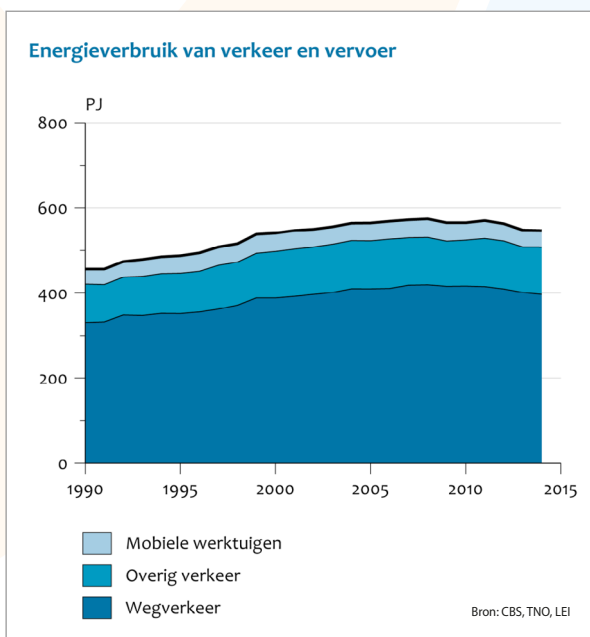


Transport

Dit betreft het wegverkeer en ander transport inclusief de scheep- en luchtvaart. Het totale energieverbruik voor verkeer en vervoer bedroeg in 2014 circa 550 PJ en betreft voornamelijk fossiele brandstoffen. Figuur 2.5 toont een historisch overzicht. Het aandeel van elektrisch openbaar vervoer (treinen, tram en metro) is gering. De Nederlandse Spoorwegen gebruikten in 2013 circa 1,3 TWh aan elektriciteit, dat overeenkwam met ruim 1% van het totale elektriciteitsverbruik (NS, 2013). Inclusief het saldo energieomzetting komt dit overeen met een gebruik van circa 12 PJ aan fossiele brandstoffen.

Het aantal elektrische en plug-in hybride aangedreven voertuigen is nog gering, maar groeit sterk. Eind 2015 bedroeg dit aantal circa 60.000 (NEV, 2015). Naast de inzet van zuinigere auto's zal deze trend naar verwachting leiden tot een afname van het fossiele energieverbruik voor deze functionaliteit, met als neveneffect een toename van het elektriciteitsverbruik en mogelijk meer net stabiliteit omdat deze voertuigen buiten de piekuren kunnen worden opgeladen. Als naast elektrisch aangedreven voertuigen ook waterstof als brandstof opkomt, zal dit leiden tot een hoger elektriciteitsverbruik als een deel van de waterstof via elektrolyse geproduceerd zou worden. Overigens wordt voorzien dat deze functie gedeeltelijk zal worden ingevuld door de inzet van synthetische brandstoffen uit (tweede generatie) biomassa en zon.

Figuur 2.5 | Energieverbruik van verkeer en vervoer (CLO, 2016)

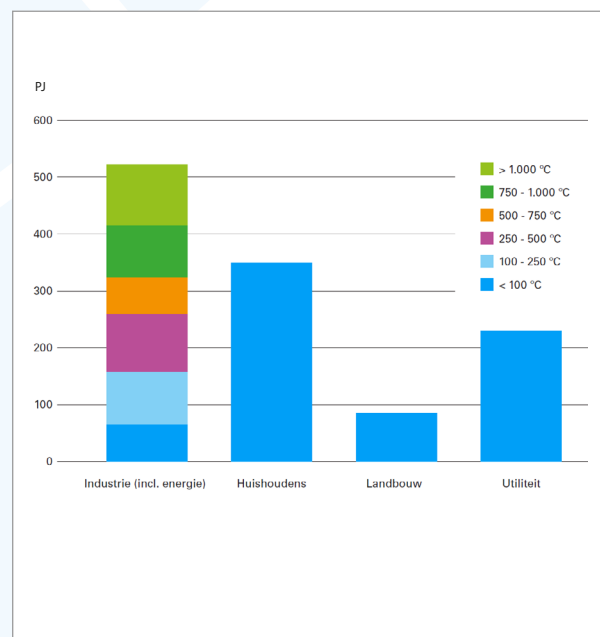


Lage temperatuur warmte

De totale warmtevraag inclusief hoge-temperatuurwarmte bedroeg in Nederland in 2014 circa 1200 PJ per jaar. Dat komt overeen met 40% van de totale energieconsumptie (CE, 2014). Ruim 60% hiervan is warmte met een temperatuur lager dan 100 °C. Dit betreft voornamelijk het energieverbruik voor verwarming en warmwatervoorziening in de bebouwde omgeving en de glastuinbouw. Figuur 2.6 geeft de uitsplitsing van de warmtevraag naar verbruiker in 2012. In Nederland wordt de warmtevraag voornamelijk gedekt door de inzet van aardgas, al dan niet gecombineerd met elektriciteitsproductie. De warmteproductie via warmtekrachtinstallaties bedroeg in 2013 circa 220 PJ.

De omslag naar een CO₂-vrije energievoorziening kan worden gemaakt door besparing en de toepassing van restwarmte gecombineerd met een verhoogde inzet van warmtepompen, geothermie, biomassa en zon. Naar verwachting zal dat leiden tot een toename van het elektriciteitsgebruik.

Figuur 2.6 | Warmtevraag uitgesplitst naar verbruiker en temperatuur. Overgenomen uit RLI (2015) maar gebaseerd op CE (2014)



Hoge temperatuur warmte

Dit betreft vooral het warmteverbruik door de industrie voor procesdoeleinden (dus anders dan voor verwarming en warmwatervoorziening). De bandbreedte in temperatuur is zeer groot, variërend van warmte bij 100-200 °C voor de voedingsmiddelenindustrie tot zeer hoge temperaturen (>1500 °C) voor de productie van metalen. Uit Figuur 2.6 blijkt dat ongeveer de helft van het industriële warmtegebruik plaatsvindt bij een temperatuur hoger dan 500 °C, met als belangrijkste afnemer de chemische industrie gevolgd door raffinaderijen. De proceswarmte wordt op dit moment voornamelijk geproduceerd door inzet van aardgas gevolgd door steenkool voor de metaalindustrie. Raffinaderijen gebruiken veelal olie (RLI, 2015).

De omslag naar een CO₂-arme hoge-temperatuur warmtevoorziening kan worden gemaakt door besparing en toepassing van restwarmte gecombineerd met een verhoogde inzet van biomassa en kernenergie.

Kernenergie



3.1 Algemeen

Kernenergie onderscheidt zich op een aantal vlakken van andere energiebronnen:

- het is een relatief complexe technologie, die een sterke kennisbasis vergt;
- toepassing van kernenergie vereist een hoge upfront investering voor nieuwbouw;
- gemeten naar het aantal ernstige ongevallen (meer dan 5 slachtoffers) in de periode 1969-2000 is gebruik van kernenergie veiliger dan dat van fossiele brandstoffen en waterkracht (OECD, 2010) en is het vergelijkbaar met duurzame energiebronnen als zonne- en windenergie;
- de invloed op de menselijke leefomgeving is beperkt.

De nucleaire industrie in Europa heeft zich de afgelopen decaden vooral gericht op het in bedrijf houden van het bestaande reactorpark, het verbeteren van de efficiëntie in de installaties en het continu verbeteren van nucleaire veiligheid, mede als reactie op de strenger wordende regelgeving. Van nieuwbouw is nauwelijks sprake geweest. Door onzekere perspectieven en de afwezigheid van beleid in de meeste Europese landen ten aanzien van de rol van kernenergie in de toekomstige energiemix, is er slechts op beperkte schaal aandacht besteed aan innovatie en ontwikkeling van nieuwe nucleaire technologie. Het besef dat in de komende decennia de CO₂-emissies in hoog tempo gereduceerd moeten worden, heeft ertoe geleid dat wereldwijd kernenergie als onderdeel van de toekomstige energie een nieuwe impuls heeft gekregen. Het World Energy Council (WEC, 2016) beschouwt drie scenario's voor de toekomstige energievoorziening. In elk van die drie scenario's stijgt het aandeel kernenergie in de energiemix. Met daarbij nog een stijgende vraag naar energie, leidt dit tot een aanzienlijke stijging van

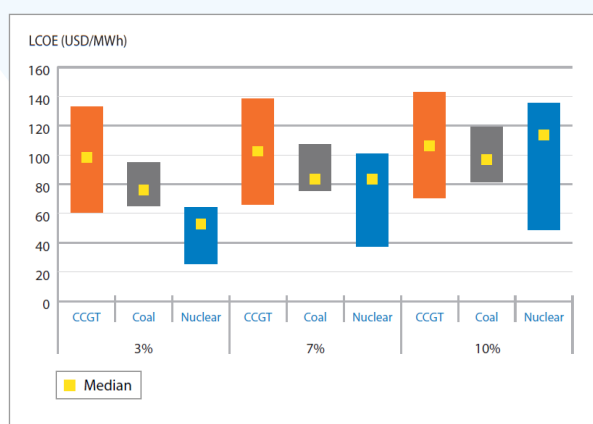
het wereldwijd geïnstalleerd nucleair vermogen. De Technology Roadmap (IEA/NEA, 2015) laat eenzelfde beeld zien. The European Reference Scenario (EU, 2016) laat voor Europa ondanks een sterke daling van het aandeel nucleair in de energiemix zien dat het geïnstalleerd vermogen nagenoeg gelijk blijft.

De kosten van alternatieven voor fossiele brandstoffen worden in grote mate bepaald door beleidsmaatregelen van de overheid als subsidie en CO₂-belasting (OECD, 2015). Verder moeten door de beperkte kennis en ervaringsbasis in Europa de weinige nieuwprojecten in West-Europa (de eerste sinds 30 jaar) als 'first of a kind' worden gezien met hoge investeringen en kostenoverschrijdingen als gevolg. In het algemeen wordt een hoogtechnologise en kennisintensieve optie als kernenergie goedkoper naarmate de inzet ervan toeneemt en de benodigde kennisinfrastructuur over meer productie-eenheden kan worden omgeslagen. De ontwikkelingen in China, waar in een hoog tempo een omvangrijke nucleaire infrastructuur is (en wordt) gerealiseerd met tientallen reactoren in aanbouw, laten niet alleen zien dat het mogelijk is kerncentrales te realiseren binnen tijd en budget maar dat kernenergie zeer snel opgeschaald kan worden, vergelijkbaar met de situatie medio jaren '80 met een wereldwijd groeitempo van circa 40 GW/jaar (WNA, 2016).

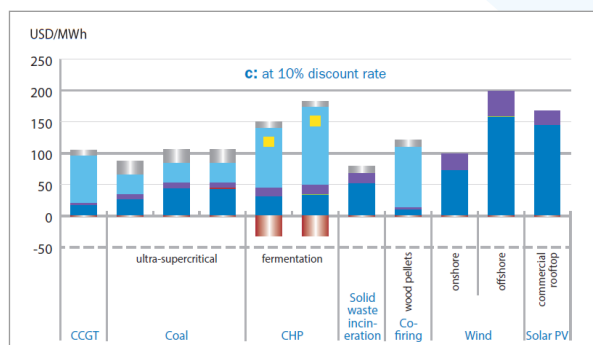
Sinds 1981 brengt de IEA in samenwerking met de OECD iedere 3 à 5 jaar een uitvoerig rapport uit over de kosten van elektriciteitsopwekking. De meest recente publicatie is uitgebracht in 2015 (IEA/OECD, 2015). Hierin worden de 'levelised costs of energy' (LCOE) bepaald. De LCOE is een economische waardering van de kosten van technologie voor energieopwekking die alle kosten over de levensduur omvatten. Figuur 3.1 laat deze LCOE zien voor verschillende basislast-energieopwekkingstechnieken, waaronder nucleair. De LCOE worden

berekend bij verschillende rentevoeten (discount rates) waarbij een rentevoet van 7 tot 10% voor de Nederlandse situatie het meest aannemelijk is. De LCOE voor nucleair ligt dan in de range van 80 tot 110 USD/MWh. In hetzelfde rapport van de IEA/OECD (2015) is voor de Nederlandse situatie een figuur opgenomen voor concurrerende technieken, zie figuur 3.2. Duidelijk wordt dat nucleair volgens deze gerenommeerde IEA/OECD studie competitief is met alle andere vormen van energieopwekking.

Figuur 3.1 | De levelised costs of generating electricity (LCOE) voor baseload energieopwekkingstechnieken bij verschillende discount rates (IEA/OECD, 2015)



Figuur 3.2 | De levelised costs of generating electricity (LCOE) voor verschillende technieken in Nederland bij een discount rate van 10% (IEA/OECD, 2015)



De IEA/OECD (2015) studie is gedaan uitgevoerd voor reactoren die nu gebouwd kunnen worden. Voor nieuwe reactortypen in de toekomst zal één van de markteisen zijn dat ze economisch competitief zijn met bestaande reactoren. De eventuele inpassing van gecombineerde warmte-kracht-opwekking bij een bestaande afnemer zal het economisch perspectief nog beter maken.

3.2 De nucleaire kennis- infrastructuur in Nederland

Uitbreiding van de nucleaire capaciteit vergt een sterke kennisbasis, zelfs indien de reactortechnologie door internationale leveranciers aangeleverd wordt. Die kennisbasis is een samenspel tussen goede (universitaire) opleidingen, kwalitatief hoogstaande nucleaire R&D, een hightech industrie en een kundige, onafhankelijke toezichthouder. Eerder dit jaar is op verzoek van het ministerie van Economische Zaken een rapport opgesteld over de huidige nucleaire infrastructuur van Nederland (Technopolis, 2016).

Het rapport bevestigt het complete en unieke karakter van de nucleaire technologieketens binnen de landsgrenzen, waarmee Nederland nationaal en internationaal een belangrijke rol kan spelen in de ontwikkeling van nieuwe nucleaire technologie, zowel voor energie opwekking, als voor medische toepassingen:

- internationaal gerenommeerde universiteit zowel op kernenergie onderzoek en ontwikkeling van medische toepassingen (TU Delft);
- unieke R&D infrastructuur en 50 jaar ervaring met nucleair onderzoek, en één van de grootste medische isotoop producenten ter wereld (NRG);
- state of the art gecentraliseerd nucleair afval management (COVRA);
- een kerncentrale die tot de veiligste 25% ter wereld behoort (EPZ Borssele);
- uraniumverrijkingstechnologie en stabiele isotopenproductie voor medische en hightech toepassingen (Urenco);
- academische ziekenhuizen en ondersteunende nucleaire faciliteiten van internationale allure met zeer sterke vertegenwoordiging in radiofarmacie en nucleaire diagnostiek.

Het rapport bevestigt de hoge kwaliteit van het nucleaire onderzoek in Nederland en benoemt de samenwerking tussen de partners en de kansen voor Nederland op het gebied van bijvoorbeeld de ontwikkeling van nieuwe reactortechnologieën. Daarmee beschikt Nederland over een goede uitgangspositie. Ontwikkeling van een nieuw kernenergieprogramma vereist echter versteviging en uitbreiding van de nucleaire infrastructuur. De afwezigheid van een duidelijk beleid van de Nederlandse overheid

heeft mede geleid tot de, ook door Technopolis geconstateerde versnippering van de kennisbasis. Binnen die toekomstige nucleaire kennisinfrastructuur is een belangrijke rol weggelegd voor Pallas, de opvolger van de Hoge Flux Reactor in Petten. Hiermee houdt Nederland ook in de toekomst de beschikking over een bestralingsfaciliteit voor het uitvoeren van nucleair onderzoek op het gebied van energie. Maar het moge ook duidelijk zijn dat Nederland voor ontwikkeling van nieuwe kernenergie, net als voor nieuwe nucleaire technologie voor medische toepassingen, ook sterk is aangewezen op internationale samenwerking. Deze samenwerking wordt nadrukkelijk gezocht door aansluiting bij Europese nucleaire platforms als het Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNE-TP), het Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform (IGD-TP), en het Multidisciplinary European Low Dose Initiative (MELODI) en door deelname in Europese samenwerkingsprojecten in het kader van Horizon 2020, maar ook bilateraal. Naast deze Europese samenwerkingen, neemt de Nederlandse bedrijven ook actief deel aan initiatieven die door de OECD/NEA en door de IAEA worden opgezet om zo de kennisbasis in Nederland goed internationaal in te bedden.

3.3 Kernenergie en de vier energiefuncties

Kernenergie past in een CO₂-arme energievoorziening en kan worden ingezet voor elektriciteitsproductie en hoge-temperatuur warmteproductie. Hoewel kernenergie ook kan voorzien in de lage-temperatuur warmtevraag, wordt dat in Nederland tot op heden slechts beperkt toegepast. Technisch is er echter geen belemmering om de restwarmte van kerncentrales te benutten. Voor de functionaliteit transport wordt verwacht dat kernenergie, met de toename van elektrisch aangedreven voertuigen, alleen indirect een rol zal spelen. Naar verwachting zal de verduurzaming van de lage-temperatuur warmtevoorziening door inzet van warmtepompen en geothermie en de verduurzaming van het wegverkeer, leiden tot een toename van het elektriciteitsgebruik. De toepassing van kernenergie voor de opwekking van elektriciteit draagt dan indirect bij aan de verduurzaming van deze functionaliteiten.

3.4 De bijdrage van kernenergie aan de reductie van emissies van broeikasgassen

Door de inzet van kernenergie zoals in figuur 1.1 aangeduid worden de emissies van broeikasgassen sterk gereduceerd. Als referentie wordt er van uitgegaan dat de opwekking met kernenergie voornamelijk opwekking met gas vervangt. Energieopwekking met gas heeft ten opzichte van de meest gebruikte fossiele alternatieven een relatief lage emissie van broeikasgassen. Echter, zelfs in dat geval zal de inzet van kernenergie zoals aangeduid in figuur 1.1 leiden tot een forse reductie in emissies van broeikasgassen. Uitgaande van een referentiewaarde in 1990 van 222 Mton CO₂-equivalenten (NEV, 2016) en de doelstelling om deze in 2050 met 90% te reduceren, zal kernenergie een bijdrage leveren van ongeveer 13% aan de totale emissiereductie en van ongeveer 30% aan de emissiereductie in de energie en industriesector.

In de hiernavolgende secties worden de opties voor toepassing van kernenergie in Nederland verder uitgewerkt.

4 Korte termijn regelbaar elektriciteitsvermogen met bewezen technologie

4.1 Bestaande capaciteit

Op dit moment bestaat de nucleaire productiecapaciteit in Nederland uit de kerncentrale in Borssele. Deze centrale heeft net als 75 andere reactoren wereldwijd (WANO, 2016) een vergunning voor verlengde bedrijfsduur van 60 jaar en zal daardoor tot 2033 operationeel kunnen blijven, mits de centrale aan de gestelde eisen van reactorveiligheid zoals opgesteld in het 'Borssele convenant' en bewaakt door de 'Borssele Benchmark Commissie' blijft voldoen (VROM, 2006) (KEW, 2014).

Internationaal wordt onderzocht of centrales die oorspronkelijk zijn ontworpen en gebouwd voor een 40-jarige bedrijfsduur, en waarvan de bedrijfsvergunning met in acht neming van veiligheidsmaatregelen verlengd is tot 60 jaar, een verdere bedrijfstijdverlenging kunnen krijgen tot 80 jaar. Op deze wijze kan met een relatief kleine investering (OECD, 2012) een belangrijke basiscapaciteit aan CO₂-arme elektriciteitsproductie in stand worden gehouden.

Kennisinfrastructuur

De bedrijfstijdverlenging van KCB dient uiteraard gepaard te gaan met continu aandacht voor de beoordeling en verbetering van de veiligheid van de centrale, voortbouwend op de kennis en ervaring van EPZ, WANO, IAEA, en van de nucleaire kenniscentra in Nederland en in het buitenland. Het internationale onderzoek ten behoeve van bedrijfstijdverlenging richt zich vooral op het verkrijgen van een beter begrip van (IAEA, 2008; OECD, 2012):

- verouderingsprocessen onder invloed van straling en corrosie in materialen, componenten en structuren,

- de ontwikkeling van methodieken voor inspectie, beoordeling en vervanging van materialen en componenten,
- en de ontwikkeling van methodieken voor de beoordeling van veiligheidsmarges en reactorveiligheid.

NRG en TU Delft spelen hierin, via deelname aan (internationale) onderzoeksprojecten en de opleiding van mensen, een belangrijke rol. Voorbeelden hiervan zijn het onderzoek naar de lessen van Fukushima, het onderzoek naar bestraald reactorvatstaal ten behoeve van bedrijfsduurverlenging, en de ontwikkeling van ultrasone inspectiemethodes (NRG, 2014).

4.2 Nucleaire nieuwbouw op korte termijn

Om de nucleaire capaciteit op relatief korte termijn te vergroten en daarmee het aandeel CO₂-arme energie in de Nederlandse energiemix significant te vergroten, kan bestaande geavanceerde LWR technologie ingezet worden. Het gaat hier om reactoren waarvan de eerste exemplaren binnen enkele jaren in gebruik zullen worden gesteld (IAEA, 2015). Bovendien zijn er wereldwijd 60 reactoren in aanbouw waarvan een groot aantal ook van de nieuwste generatie (WANO, 2016). Zulke reactoren zouden realistisch gezien binnen 10 tot 15 jaar in Nederland gerealiseerd kunnen worden. Deze tijd is nodig om enerzijds de beslissing voor te bereiden; anderzijds omvat het de constructietijd van ongeveer 5 tot 10 jaar.

Om de efficiëntie te vergroten kan gedacht worden aan de inzet van lichtwaterreactoren met warmtekracht koppeling. In dat geval kan een deel van de restwarmte

die normaal afgevoerd wordt naar de omgeving, ingezet worden als lage-temperatuur warmtebron voor bijvoorbeeld verwarming en andere lage-temperatuur warmtetoepassingen. Dit is in verschillende buitenlandse projecten al succesvol toegepast (IAEA, 2007).

Diverse scenariostudies (EC, 2011; WEC, 2013) laten zien dat bij volledige CO₂-vrije energievoorziening, een inzet van kernenergie nodig is variërend tussen 5 en 20%. Hierbij wordt opgemerkt dat veel scenario's uitgaan van een CO₂-reductie in 2050 van 80-85%, terwijl tijdens de COP21 conferentie (COP, 2015) nog ingrijpendere streefwaarden zijn afgesproken. Deze roadmap gaat uit van een bescheiden, maar realistische inzet van kernenergie van circa 20% in de elektriciteitsproductie. Ruwweg komt deze fractie overeen met het productietekort waar opslag niet in kan voorzien indien maximaal wordt ingezet op hernieuwbare bronnen; het zogenoemde 'wintergat' (DEI, 2010).

Met het huidige Nederlands elektriciteitsverbruik komt deze 20% overeen met circa 25 miljard kWh elektriciteit, dat kan worden gedekt door twee of drie moderne lichtwaterreactoren van de derde generatie met een totale productiecapaciteit van 3000 MWe. Omdat naar verwachting niet alleen het aandeel elektriciteit in de energiemix zal stijgen, maar ook de autonome elektriciteitsvraag, zal het aantal kerncentrales in Nederland in de loop van de tijd verder moeten toenemen. Hierin kan op middellange termijn worden voorzien door warmtekracht koppeling met inzet van Hoge Temperatuur Reactoren (HTR) (zie volgend hoofdstuk). Overigens hoeft de bijdrage van kernenergie niet beperkt te blijven tot de basislastvoorziening. Moderne kerncentrales worden nu al volop ingezet om lastvariaties op te vangen tussen 50 en 100% van het nominaal vermogen met een tempo van 5% per minuut (NEA, 2011) en kunnen ook prima de variaties van intermitterende bronnen opvangen.

Kennisinfrastructuur

Ter ondersteuning van deze nieuwbouw zal onderzoek zich vooral moeten richten op verhoging van de duurzaamheid van deze reactoren, verlaging van het investeringsrisico, reductie van het hoogradioactief afval (hoeveelheid en tijd) en een veiligheidsniveau dat ruimschoots blijft voldoen aan de acceptatienormen die de maatschappij aan industriële activiteiten stelt.

Door toepassing van passieve veiligheidsmechanismen en grotere veiligheidsmarges kunnen langere autarkietijden worden behaald. Onderzoek naar nieuwe materialen voor de splijtstofmatrix en -hulzen en de inzet van MOX splijtstof (plutoniumoxide gemengd in uraniumoxide) kunnen leiden tot een hogere opbrand, waardoor minder splijtstof nodig is en minder afval geproduceerd wordt. Onderzoek naar geologische eindberging blijft nodig. Hieraan wordt momenteel al in belangrijke mate bijgedragen door TU Delft, COVRA en NRG.

Maatschappij

Belangrijkste randvoorwaarde voor het realiseren van nucleaire nieuwbouw wereldwijd is de financiering. Nucleair is uniek in de lange bouwtijd in combinatie met de grote investeringen die vooraf nodig zijn, waarbij de terugverdientijd relatief lang is en de risico's voor de private investeerders dus groot zijn. Om deze risico's te beperken is in de eerste plaats een stabiel politiek klimaat nodig. Daarnaast kan de maatschappij en de politiek steun bieden door het accommoderen van financiële constructies, zoals in bijvoorbeeld in Finland met financiering door de toekomstige gebruikers of zoals in het Verenigd Koninkrijk met het afdekken van prijs variaties. Andere belangrijke elementen zijn stabiliteit in het vergunningskader en stabiliteit in het subsidiebeleid. Vanuit de industrie kan de mogelijkheid onderzocht worden om modulair kleinschalige systemen in te zetten, waarvan momenteel meerdere varianten ontwikkeld worden gebaseerd op bestaande LWR technologie (IAEA, 2011; Kani, 2016). Met een lager vermogen per eenheid zullen de investeringen en daarmee de risico's kleiner zijn. Bovendien geeft modulaire bouw de mogelijkheid om cash flow te genereren met de eerste modules terwijl latere in aanbouw zijn. Dit is belangrijk voor de beperking van het financiële risicoprofiel. Daarentegen zijn dergelijke systemen mogelijk duurder per opgewekte energie-eenheid.

Naast bovengenoemde factoren speelt ook de publieke opinie over kernenergie een belangrijke rol. Proactieve, eerlijke en transparante voorlichting over de mogelijkheden, de voor- en nadelen en de noodzaak van kernenergie in het kader van een CO₂-vrije energievoorziening zijn noodzakelijk voor de acceptatie van kernenergie in de Nederlandse samenleving.

Middellange termijn nucleaire warmtekracht voor de Nederlandse procesindustrie

5.1 Nucleaire warmtekracht voor de Nederlands industrie

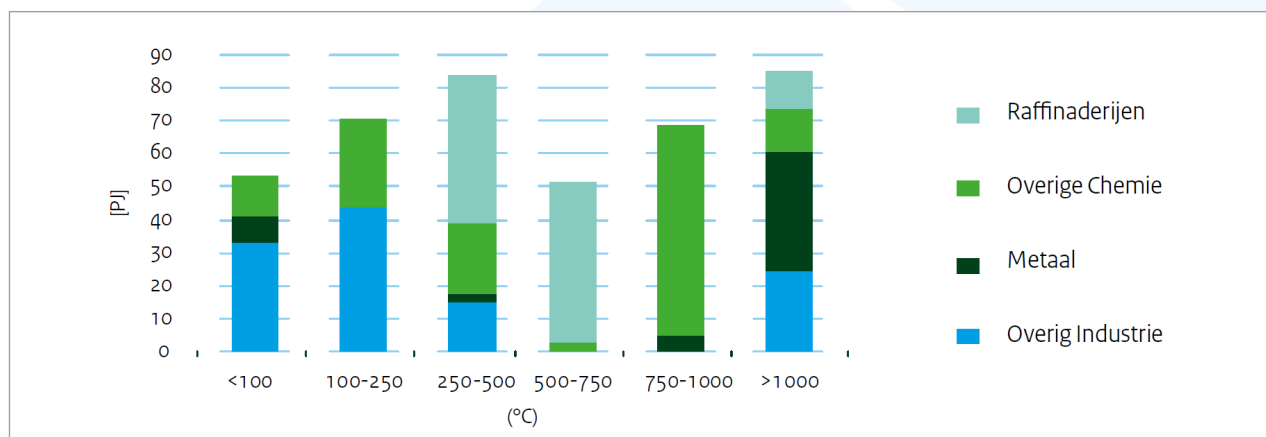
Minder dan de helft van ons energiegebruik is bestemd voor de productie van elektriciteit (zie Tabel 1.1). Een groot deel hiervan is de industriële toepassing in de vorm van proceswarmte bij hoge temperatuur. Deze vraag wordt nu vooral gedekt met fossiele brandstoffen. De koppeling van warmte en kracht met speciaal daarvoor uitgeruste kerncentrales heeft een groot potentieel voor reductie van de CO₂-uitstoot.

De industrie vraagt vooral om warmte met hoge temperatuur (zie Figuur 2.6) waar de huidige lichtwaterreactoren niet aan kunnen voldoen. Al in de jaren '70 en '80 zijn met name in Duitsland en in de VS demonstratiereactoren gebouwd van het type hoge temperatuur reactor (HTR) (IAEA, 2012). Dit soort reactoren wordt algemeen beschouwd als inherent veilig (kernsmeltongevallen zijn uitgesloten) en is uitermate geschikt om naast elektriciteitsopwekking ook proceswarmte met een temperatuur tot 750 °C te leveren. De HTR wordt typisch met heliumgas gekoeld,

hoewel de laatste jaren met name in de VS uitgebreid onderzoek wordt gedaan naar de mogelijkheden van gesmolten fluoridezouten als koelmiddel met als doel het systeem compacter en economischer te maken. Zulke reactoren worden geavanceerde hoge temperatuur reactoren (AHTR) of fluoride-zout gekoelde hoge-temperatuur reactoren (FHR) genoemd. De ontwikkeltijd van dit soort reactoren is uiteraard sterk afhankelijk van de onderzoeksbudgetten maar zal zeker niet binnen een termijn van 10 jaar liggen.

De huidige versie van de gasgekoelde HTR die in China in aanbouw is heeft een vermogen van 250 MWth en kan 8 PJ per jaar proceswarmte leveren bij een temperatuur tot 750 °C. De huidige markt bedraagt circa 130 PJ en is bijna geheel bestemd voor de raffinage van olie, zie Figuur 5.1 (EZ, 2010). Deze markt kan voor een belangrijk deel worden gedekt met 10 tot 20 reactoren. Op de lange termijn is de marktomvang van deze categorie echter niet concreet te duiden, omdat bij een volledige decarbonisatie van onze warmtevoorziening, de consumptie, en daarmee de raffinage, van olie vervangen zal moeten worden door alternatieven. Dit zal naar verwachting gedeeltelijk

Figuur 5.1 | Nuttige warmte in de Nederlandse industrie verdeeld naar temperatuurwaarde (EZ, 2010)



worden opgevangen door elektrificatie van het wegtransport, maar ook door de productie van biodiesel van de tweede generatie (Dam, 2011). Deze laatste optie heeft ook een grote warmtevraag tot gevolg.

Als met toepassing van nieuwe materialen de HTR bij nog hogere temperatuur (tot 1000 °C) bedreven zou kunnen worden, komt hier nog een marktpotentieel bij van circa 70 PJ (zie Figuur 5.1) en bij nog hogere temperaturen zelfs meer dan twee keer zoveel. Bovendien zal de behoefte aan warmte met temperatuur boven 1000 °C sterk toenemen als waterstofproductie via thermochemische splitsing van water (CRC, 2011) mogelijk wordt en een hoge vlucht zou nemen.

Een recente ontwikkeling richt zich op zogenoemde microreactoren met een voor nucleaire begrippen zeer klein vermogen van 5-10 MW voor decentrale warmtekrachtproductie. Een voorbeeld hiervan is de U-battery (Ding, 2011; <https://www.u-battery.com>).

Kennisinfrastructuur

Op het gebied van HTR is vanaf de jaren '90 een sterke kennisbasis opgebouwd in Nederland bij zowel NRG als de TU Delft. Om deze optie voor Nederland te realiseren zal deze kennisbasis echter verder versterkt moeten worden. De doorontwikkeling van de HTR om deze geschikt te maken voor productie van warmte met temperatuur boven 1000 °C vraagt nog veel onderzoek en ontwikkeling. Met deze VHTR (Very High Temperature Reactor) kunnen nog hogere rendementswaarden behaald worden, bestaande toepassingen (staalproductie, cementindustrie en de bulkchemie) worden bediend en nieuwe toepassingen zoals waterstofproductie mogelijk worden. Hiervoor is nog ontwikkeling nodig op het gebied van brandstof en materialen. Een ander innovatief aspect is de toepassing van thorium. Verder is onderzoek gewenst naar de reductie van het volume en de levensduur van HTR nucleair afval en de mogelijke inzet van plutonium als splijtstof.

Maatschappij

Om de inzet van HTR te faciliteren dient allereerst het vergunningskader opgebouwd te worden. Hiertoe kunnen de voormalige ervaring in Duitsland en de huidige ervaring in China¹ gebruikt worden. Niet alleen vergunningstechnisch, maar ook vanwege de kennis en ervaring, die in China is opgebouwd, is het verstandig om samenwerking met China op te zetten. Een dergelijke samenwerking zou voor China een ingang kunnen betekenen op de Westerse markt. Daarmee zou het bedrijfsleven in Nederland mogelijk ook kunnen rekenen op ondersteuning voor de financiering vanuit China.

¹ In China is een HTR in aanbouw die naar verwachting binnen enkele jaren elektriciteit zal leveren.

Lange termijn regelbaar elektriciteitsvermogen en warmtekracht op basis van Generatie-IV reactortechnologie en een gesloten splijtstofcyclus

6.1 Nucleair in duurzame energiemix voor de lange termijn

Met de huidige inzet van nucleair en het verbruik van uranium als natuurlijk grondstof, wordt het veelal gezien worden als een eindige (weliswaar op de zeer lange termijn) vorm van CO₂-vrije energieopwekking. Echter, wanneer uraniumwinning uit zee, waarin de voorraden nagenoeg oneindig zijn zoals beschreven in Kernvisie (2016), economisch haalbaar wordt zoals beschreven, dan moet kernenergie daarmee gerekend worden tot de duurzame bronnen. Er bestaan echter goede mogelijkheden om nucleair nog verder te 'verduurzamen' waardoor de grootschalige inzet van kernenergie kan worden opgerekt naar tienduizenden jaren. Hiertoe kunnen twee routes bewandeld worden die ook door PBL (2016) genoemd worden.

De eerste route is de inzet van uranium-plutonium splijtstofcyclus waarbij de grote hoeveelheden verarmd uranium uit de verrijkingsindustrie aangesproken worden. Hiertoe kunnen zogenoemde snelle reactoren worden ingezet, die niet worden gekoeld met water, maar met vloeibare metalen. Hoewel er wereldwijd een aanzienlijke kennisbasis en ervaring bestaat met de toepassing van natrium als koelmiddel, zijn er met name in Europa het laatste decenium grote stappen gezet in de toepassing van vloeibaar lood. Een lood-gekoelde snelle reactor (LFR) is mogelijk aantrekkelijker vanuit het oogpunt van veiligheid en bedrijfseconomie.

De tweede route is de inzet van de thorium cyclus zoals ook aangegeven door PBL (2016). Thorium is ruim aanwezig op aarde en kan met name in een gesmolten zout (MSR) als kweekstof worden ingezet. In een MSR wordt het thorium opgelost in een fluoridezout dat tevens dienst doet als koelmiddel. Tijdens bedrijf wordt het thorium omgezet in uranium dat vervolgens wordt

verspleten. Tevens kunnen tijdens bedrijf de meeste splijtingsproducten uit het zout worden verwijderd en thorium worden toegevoegd. De achterblijvende splijtingsproducten blijven sterk gebonden aan het zout en vormen geen gevaar.

De MSR is een nucleair systeem met zeer veel perspectief, maar vergt nog veel onderzoek. Ook het opstarten en optimaliseren van de thorium cyclus kost tijd. Een voordeel is dat een MSR ook gebruik kan maken van de uranium-plutonium cyclus, wat toepassing op de middellange termijn reeds mogelijk maakt. Met de opgedane kennis en ervaring kan de thoriumcyclus sneller ontsloten worden. Op lange termijn biedt de thorium MSR de mogelijkheid tot een vrijwel onuitputtelijke bron van energie zonder grootschalige productie van langlevend nucleair afval.

Er moet opgemerkt worden dat de MSR technologie al in het midden van de vorige eeuw uitgebreid is onderzocht, maar dat dit geen vervolg heeft gekregen door de aandacht voor de uranium-plutonium splijtstofcyclus in LWR en snelle metaalgekoelde reactoren (Serp, 2014). Deze waren op dat moment verder ontwikkeld en boden beter perspectief op een snelle introductie van kernenergie. De MSR technologie is sindsdien beperkt verder onderzocht, maar staat sinds 15 jaar in het kader van Generatie-IV reactoren weer volop in de belangstelling. Het onderzoek richt zich met name op de chemie van de fluoridezouten en van de opwerkingsprocessen, de interactiemechanismen van zouten met materialen en de speciale aspecten van een vloeibare splijtstof op de veiligheidsstudies en -beoordeling.

Zowel de LFR als de MSR werken bij lage druk en hebben passieve tot inherent veiligheidskenmerken. Ze produceren warmte met een temperatuur die hoger ligt dan de bedrijfstemperatuur in lichtwaterreactoren, maar niet zo hoog als in een HTR. Daarvoor is onder-

zoek nodig naar nieuwe materialen. Toch behoren hoge-temperatuur warmtetoepassingen in bijvoorbeeld de proceschemie (tot 750 °C) ook tot de mogelijkheden.

Kennisinfrastructuur

Voor het onderzoek aan de LFR als de MSR is zowel aan de TU Delft als bij NRG in Petten een uitgebreide kennisbasis aanwezig, waarbij TU Delft zich meer richt op de fundamentele aspecten zoals de oplosbaarheid van splijtingsproducten in gesmolten zouten, het meten en berekenen van de thermodynamische stabiliteit en andere thermodynamische data van gesmolten zouten, de ontwikkeling van nieuwe numerieke methoden voor veiligheidsstudies en simulatie van de splijtstofcyclus, en de meting en berekening van de koelmiddelstroming rondom splijtstofstaven en de vibraties die daaruit kunnen voortkomen.

NRG richt zich vooral op de inzet van de HFR, omdat deze onderzoeksreactor als één van de weinige in de wereld geschikt is voor materiaalonderzoek ten behoeve van de LFR en MSR. Zo is NRG in 2016 gestart met de voorbereidingen voor de eerste bestraling wereldwijd sinds 50 jaar van gesmolten zout met opgeloste splijtstof. Hierbij moet ook opgemerkt worden dat de HFR, door de aanwezigheid van een hoge flux buiten de reactorkern, essentiële veiligheidstesten en kwalificatiebestralingen voor de LFR en MSR kan doen, wat in andere onderzoeksreactoren vrijwel niet mogelijk is. De HFR is daarmee een strategische infrastructuur, die het onderzoek in Nederland een belangrijke rol geeft in de internationale ontwikkelingen van deze geavanceerde reactoren. Dit wordt erkend in het recente rapport van het planbureau voor de leefomgeving (PBL, 2016).

Maatschappij

Door de verwachte groei van de wereldbevolking naar 11 miljard mensen in 2100 en de stijgende welvaart in nu nog achtergestelde gebieden, zal de mondiale energievraag blijven stijgen en de noodzaak voor een CO₂-vrije energieproductie steeds urgenter worden. Om deze wereldproblematiek het hoofd te bieden, zou de Westerse samenleving, mede gezien haar grote historische bijdrage aan de antropogene CO₂-emissies, voorop dienen te lopen in de transitie naar een CO₂-vrije energievoorziening en daarbij alle opties te ontwikkelen die hieraan kunnen bijdragen. De ontwikkeling van duurzame kernenergie gebaseerd op de toepassing van de uranium-plutonium cyclus in snelle metaalgekoelde reactoren of op de toepassing van de thorium splijtstofcyclus in gesmolten zout reactoren, past in dit beleid. Nederland kan met haar unieke faciliteiten hierin een belangrijke rol spelen. Met de juiste allianties en partnerschappen kan Nederland direct bijdragen aan en profijt hebben van de commerciële ontwikkeling van deze veelbelovende nucleaire technologieën. Gezien het lange termijn karakter van deze opties, is een ondersteuning van de Nederlandse en Europese overheid voor de ontwikkeling van deze opties onontbeerlijk. Zoals al eerder opgemerkt is de ontwikkeltijd van dit soort reactoren uiteraard sterk afhankelijk van de onderzoeksbudgetten maar deze zal zeker niet binnen een termijn van 10 jaar liggen.

7 Conclusies

Kernenergie kan in 2050 een belangrijke bijdrage leveren aan een CO₂-vrije energievoorziening in Nederland. Uitgaande van een nucleaire bijdrage aan de elektriciteitsvoorziening van 20%, zijn twee of drie kerncentrales nodig met een gezamenlijk vermogen van 3000 MWe. De vergunningverlening en bouw van moderne lichtwaterreactoren (LWR) neemt ruim 10 jaar in beslag, zodat Nederland vanaf 2030 hierover zou kunnen beschikken. Om dat mogelijk te maken is het noodzakelijk dat de kerncentrale Borssele in bedrijf blijft, zodat de benodigde praktijkervaring bij de exploitant en de Nederlandse overheid en het ondersteunende onderzoek en onderwijs bij NRG en TU Delft in stand gehouden wordt.

Om aan de vraag naar proceswarmte te voldoen, kunnen hoge temperatuur gasgekoelde reactoren (HTR) worden ingezet. Deze reactoren kunnen elektriciteit en warmte leveren bij een temperatuur tussen 250 en 750 °C. De markt hiervoor bedraagt momenteel 130 PJ en dat zou met 10 tot 20 reactoren volledig gedekt kunnen worden. Indien de Very High Temperature Reactor (VHTR) op de markt zou komen, kan tevens de behoefte aan warmte met hogere temperaturen voor de proces- en metaalindustrie worden gedekt met kernenergie. Deze markt bedraagt nu 100-150 PJ en zou tevens met 10 tot 20 reactoren kunnen worden ingevuld.

Een belangrijke verbetering in de duurzaamheid van kernenergie kan worden gerealiseerd door de toepassing van de uranium-plutoniumcyclus in snelle metaalgekoelde reactoren of door de toepassing van de thoriumsplijstofcyclus in gesmolten zout reactoren. Nederland levert een belangrijke bijdrage aan het onderzoek naar deze technologieën, waarmee voor vele duizenden jaren voorzien kan worden in de productie van elektriciteit en warmte.

Gedurende iedere fase is er behoefte aan onderzoek en opleiding van mensen. Beide gaan hand in hand want een goede opleiding gaat niet zonder grensverleggend onderzoek en kennis van de laatste stand van de techniek. Voor de bedrijfsduurverlenging van de kerncentrale Borssele ligt de nadruk op inspectie en beoordeling van materialen, componenten en reactorveiligheid. Voor de nieuwbouw van geavanceerde lichtwaterreactoren zal het onderzoek zich richten op nieuwe materialen, efficiënter splijstofgebruik en de inzet van mengoxide splijstof, passieve reactorveiligheid en verbetering van de splijstofcyclus. Voor de introductie van de HTR ligt de nadruk op splijstofonderzoek en nieuwe materialen ten behoeve van bedrijf bij zeer hoge temperatuur en op het dynamisch gedrag van de reactor bij wisselende productie van elektriciteit en warmte. Voor de lange termijn richt het onderzoek zich op metaalgekoelde snelle reactoren met een gesloten uranium-plutonium splijstofcyclus en op de toepassing van de schone thorium splijstofcyclus in gesmolten zout reactoren.

Het is de visie van de Vereniging Nucleair Nederland dat kernenergie een belangrijke rol kan spelen in een toekomstige economisch verantwoorde, betrouwbare en CO₂-vrije energievoorziening. Bezien vanuit de productiekosten is kernenergie een economisch aantrekkelijke optie. Onderzoek naar veiliger en schonere kerncentrales en splijstofcycli maken dat kernenergie ook op het gebied van duurzaamheid zal kunnen blijven concurreren met andere vormen van CO₂-vrije energieproductie. De Vereniging beveelt daarom aan de nucleaire kennisbasis in Nederland uit te bouwen en een langere termijn energiebeleid te realiseren, waar kernenergie onderdeel van uitmaakt. Naast versterken van de kennisbasis, hoort daarbij het realiseren van een vergunningsbasis voor reactortypen die geschikt worden bevonden voor toepassing in Nederland. Dit vergt ook versterking van de toezichthouder/vergunningverlener.

Referenties

- CBS, 2010:
Het energieverbruik voor warmte afgeleid uit de Energiebalans, update 2010.
- CBS, 2015:
Elektriciteit in Nederland, Feb 2015.
- CBS, 2016:
Inzet energiedragers en bruto elektriciteitsproductie, 1995-2014, 2016.
<http://www.clo.nl/indicatoren/nl0019-inzet-energie dragers-en-bruto-elektriciteitsproductie?ond=20881>
- CE, 2014:
Schepers en Aarnink, Kansen voor Warmte, CE, Delft, 2014.
- CLO, 2016:
Energieverbruik door verkeer en vervoer, Compendium voor de Leefomgeving, 2016.
<http://www.clo.nl/indicatoren/nl0030-energieverbruik-door-verkeer-en-vervoer>
- COP, 2015, COP21:
United Nations Climate Change Conference, Paris, Nov 30-Dec 12, 2015.
- CRC, 2011:
Yan en Hino (eds), Nuclear Hydrogen Production Handbook, CRC Press, ISBN 978-1-4398-1084-2.
- Dam, 2011:
Damartzis en Zabaniotou, Thermocahemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design-A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15:366-378 (2011).
- DEI, 2010:
De energievoorziening van Nederland 2.0, Delft Energy Initiative, KIVI, 2010.
http://enipedia.tudelft.nl/wiki/De_energievoorziening_van_Nederland_2.0
- Ding, 2011:
Ding *et al*, Design of a U-battery, TU Delft, Manchester University, Final report PNR-131-2011-014, Delft.
- EC, 2011:
Commission staff working paper, Impact Assessment, SEC(2011) 1565.
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/sec_2011_1565_part2_0.pdf
- EZ, 2010:
Agentschap NL, Warmte in Nederland, Publicatie nr 2NECW1003.
http://www.energymatters.nl/Portals/0/Glastuinbouw/Ondernemersplatform/2010_10/NEW%20Warmte%20in%20Nederland_tcm24-289907.pdf
- EZ, 2016:
Energierapport, Transitie naar Duurzaam, 2016.
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/01/18/energie-rapport-transitie-naar-duurzaam>
- IAEA, 2008:
Safe Long Term Operation of Nuclear Power Plants.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1340_web.pdf
- IAEA, 2012:
Advanced in Nuclear Power Process Heat Applications, IAEA-TECDOC-1682, 2012.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1682_web.pdf
- IAEA, 2007:
Advanced Applications of Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1584, 2007.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1584_web.pdf
- IAEA, 2011:
Status of Small and Medium Sized Reactor Designs. A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS).
<http://aris.iaea.org>
- IAEA, 2015:
Advanced Large Water Cooled Reactors. A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS).
<http://aris.iaea.org>
- Kani, 2016:
Kani, Zandieh and Abadi, Design Characteristics for Pressurized Water Small Modular Nuclear Power Reactors with Focus on Safety, ATW, Vol 61, Issue 5, 2016.
- KEW, 2014:
Kernenergie wet, geldend vanaf 25 jan 2014 tot heden.
- NEA, 2011:
A. Lokhov, Load-Following with nuclear power plants, NEA updates, NEA news no 29.2, 2011.
- NEV, 2015:
Nationale energieverkenning 2015, ECN, PLO, CBS, RvON, 2015.
- NNL, 2016:
Nucleaire Kennisinfrastructuur in Nederland, Vereniging Nucleair Nederland, 2016.
- NRG, 2014:
Onderzoeksjaarverslag 2014. Petten, Nederland.
<https://www.nrg.eu/over-nrg/research-innovatie/voorbereid-op-de-toekomst.html>
- NS, 2013:
Jaarverslag, Nederlands Spoorwegen, 2013.
- OECD, 2010:
Comparing nuclear accident risks with those from other energy sources.
- OECD, 2012:
The Economics of Long-term Operation of Nuclear Power Plants, 2016.
- OECD, 2015:
Technology Roadmap Nuclear Energy: 2015 edition.
- PBL, 2016:
Opties voor energie- en klimaatbeleid. Planbureau voor de Leefomgeving, publicatienummer 2393.
- RLI, 2015:
Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur, Rijk zonder CO₂, 2015.
- Roglj, 2016, Roglj, etc:
Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C, Nature, Vol 534, 30 June 2016.
- Serp, 2014, Serp etal:
The Molten Salt Reactor (MSR) in Generation-IV: Overview and Perspectives, Progress of Nuclear Energy, 77:308-319 (2014).
- TEC, 2016, Technopolis:
Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland; Inventarisatie en relatie met publieke belangen. Amsterdam, Nederland.
- Technopolis, 2016:
Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland.
- VROM, 2006:
Convenant Kerncentrale Borssele, Staatscourant nr 136:29, 17 juli 2006.
- WANO, 2016:
Plans for New Reactors Worldwide
<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>
- WEC, 2013:
World Energy Scenarios – Composing energy futures to 2050, World Energy Council, London, ISBN 778-0-946-121
- WNA, 2016:
<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>



NucleairNederland

www.nucleairnederland.nl