



provincie **HOLLAND**
ZUID

Literatuurstudie stand van zaken kernenergie motie 903

april 2020
Provincie Zuid-Holland

Inhoudsopgave

april 2020	1
Provincie Zuid-Holland	1
Context	3
Europa (EU)	3
Visies op de toepassing van kernenergie	4
De mogelijkheid van nieuwbouw van een kerncentrale in Nederland	4
Nederland en de Kernenergiewet	5
Bevoegd gezag	6
Waarborgingsbeleid Kernenergie	7
Provincies en gemeenten	7
Techniek, stand van zaken en ontwikkelingen	8
Uranium en Thorium	9
Opwerking en Afval	9
Kernenergie en duurzaamheid	10
Typen kernreactoren	11
Eerste en tweede generatie reactoren	11
Derde generatie reactoren	11
Vierde generatie reactoren	12
Molten Salt Reactor (MSR)	13
Stable Salt reactor	14
Snelle kweekreactoren (Fast Breeders)	15
Very High Temperature Reactor (VHTR)	15
Super critical water cooled reactor (SCWR)	16
Kleine, modulaire reactoren (SMR)	16
Kernfusie	17
Kosten kernenergie	17
Mogelijke rol van kernenergie in de toekomstige energiemix	20
Afsluitende opmerking	22
Bijlage	23
Behandelvoorstel:	23

Context

Wereldwijd waren op 1 januari 2019 in totaal 450 kernreactoren operationeel met een gezamenlijke capaciteit van 399 Gigawatt elektrisch vermogen (GWe). Daarmee werd in 2019 circa 10% van het mondiale elektriciteitsgebruik gedekt en circa 4% van het mondiale energiegebruik¹.

Binnen de EU wordt in veertien landen kernenergie geproduceerd, in 2019 goed voor ruim 25% van de totale elektriciteitsproductie.

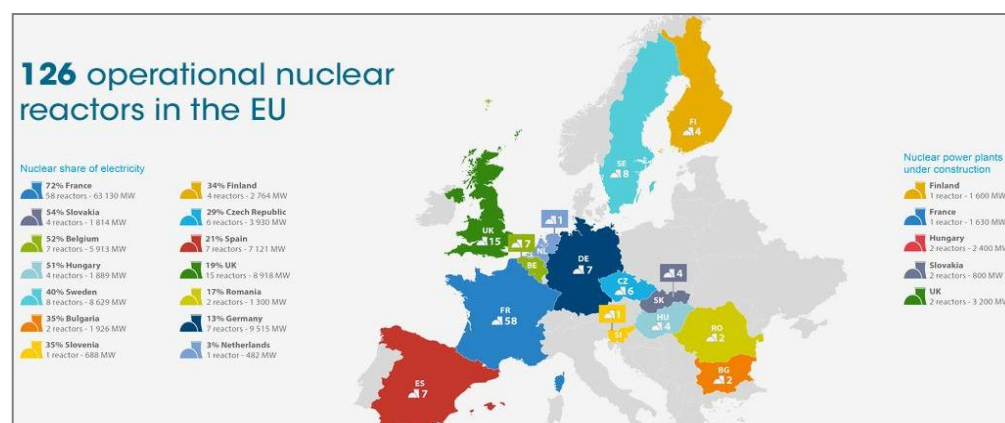
Nederland heeft één kernreactor voor elektriciteitsproductie. Deze staat bij de kerncentrale Borssele, heeft een vermogen van 485 MWe en dekt circa 3% van de nationale elektriciteitsvraag. De centrale werd in 1973 in gebruik genomen. Wettelijk bepaald wordt de kerncentrale uiterlijk 2033 gesloten.

De bouw van een nieuwe centrale vergt gemiddeld circa 10 jaar. Op dit moment zijn er volgens de Rijksoverheid geen plannen, ook niet bij bedrijven, voor de bouw van een nieuwe centrale.²

Behalve de kernreactor in Borssele bestaan er in Nederland nog twee heel kleine reactoren. Die worden voor onderzoek of voor de productie van voornamelijk medische isotopen gebruikt. De ene staat in Petten en de andere in Delft. Aan vervanging van de reactor in Petten, de zogenaamde Hoge Flux Reactor (HFR), wordt thans met steun van het kabinet en ook van de provincie Noord-Holland gewerkt: het Pallas-project.³

Europa (EU)

Ruim een kwart van het totale Europese elektriciteitsgebruik - niet te verwarren met totale energiegebruik - wordt door kerncentrales opgewekt (zie figuur 1).⁴ Vanaf de jaren '50 hebben de zes eerste lidstaten van de EU zich op kernenergie gericht als middel voor onafhankelijkheid op energiegebied. Daaruit is de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie (Euratom) voortgekomen waarbij ook Nederland is aangesloten. De hoofddoelstellingen van Euratom zijn: (1) bijdragen aan de totstandkoming en ontwikkeling van de Europese nucleaire industrie, en (2) het waarborgen van de continuïteit van de energievoorziening. Daarnaast zijn doelstellingen: het bevorderen van (innovatief) onderzoek, het verspreiden van technische kennis, het waarborgen van een hoog niveau van veiligheid voor de bevolking en het voorkomen dat nucleair materiaal dat voor



vreedzame, civiele doeleinden is bestemd wordt ingezet voor militaire doeleinden.⁵

¹ Factsheet Prof. Dr B. van der Zwaan, 'Kernenergie in de praktijk', Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

² Ministerie van EZK, 'Beantwoording vragen rol kernenergie in energiemix', 2019 (DGKE-E / 19005268).

³ <https://www.pallasreactor.com/>.

⁴ <https://www.nucleairforum.be/thema/wereldwijd/europese-unie>.

⁵ <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/nl/sheet/62/kernenergie>.

Figuur 1: De bijdrage van kernenergie aan de elektriciteitsmix in de verschillende EU-landen in 2018.⁶

Visies op de toepassing van kernenergie

De visie op het toepassen van kernenergie in de energievoorziening verschilt binnen de EU sterk.⁷ Terwijl bijvoorbeeld Duitsland, België, Zwitserland en ook Zweden het gebruik van kerncentrales in hun land willen afbouwen, wordt in onder meer Frankrijk en Finland, net als in de UK, gewerkt aan de bouw van nieuwe kerncentrales. Dit uit zich ook in de Europese Green Deal, waarbinnen lidstaten zelf over de energiemix en over de in te zetten technologieën besluiten om in hun behoeften te voorzien, mits de overeengekomen beperking van de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen wordt gerealiseerd.⁸

Ook mondiale studies die gericht zijn op het beperken van de stijging van de temperatuur op aarde als gevolg van klimaatverandering door menselijk handelen laten een gemengd beeld zien. Door het Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) is dit in oktober 2018 als volgt samengevat: *“In de meeste 1,5-graad emissiepaden neemt het aandeel van kernenergie in de energievoorziening toe. Maar er zijn ook scenario's waarin het aandeel zowel absoluut als relatief afneemt. In sommige emissiepaden neemt de bijdrage van kernenergie af tot nul procent aan het eind van deze eeuw, terwijl er ook scenario's zijn waarin de bijdrage juist sterk toeneemt, tot soms wel meer dan 200 EJ per jaar”*.⁹

Een uitspraak over de noodzaak of wenselijkheid van het gebruik van kernenergie in de energievoorziening doet het IPCC niet. Dat zou te politiek zijn.¹⁰

Wel presenteert het rapport in de samenvatting voor beleidsmakers ter illustratie vier energiepaden met verschillende keuzes wat betreft de bijdrage van kernenergie die alle tot de afgesproken 1,5 °C temperatuurstijging leiden. In deze vier paden wordt in absolute termen, en in wisselende gradaties, in 2050 méér gebruik gemaakt van kernenergie dan in 2017.

De mogelijkheid van nieuwbouw van een kerncentrale in Nederland

Over de mogelijkheid om in Nederland een nieuwe kerncentrale te bouwen, schreef de minister van Economische Zaken en Klimaat op 25 januari 2019, in antwoord op vragen uit de Tweede Kamer, het volgende: *“Sinds begin jaren zestig is er een Kernenergiewet die het mogelijk maakt om een aanvraag voor een nieuwe kerncentrale te doen. Dat houdt in dat marktpartijen die aan alle randvoorwaarden voldoen, zoals nucleaire veiligheid en voldoende financiële reservering voor ontmanteling en verwerking van afval, in aanmerking kunnen komen voor een vergunning voor de bouw van een kerncentrale. Van die mogelijkheid is in de afgelopen decennia echter geen gebruik gemaakt. De huidige marktomstandigheden in relatie tot het investeringsklimaat zijn hiervoor de voornaamste reden.”*¹¹

De minister verwees hierbij naar de ‘Randvoorwaardenbrief Kernenergie’ uit 2011, geschreven door een voorganger van hem. In deze brief wordt, met verwijzing naar de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt, gemeld dat de regering niet zelf in kernenergie investeert maar randvoorwaarden stelt. Het vervolgt met: *“Binnen de randvoorwaarden is het aan de marktpartijen om al dan niet te investeren in kernenergie. Aanvragen van vergunningen voor de bouw van een of meer nieuwe kerncentrales die voldoen aan de vereisten, worden ingewilligd”*.¹²

⁶ <https://www.foratom.org/facts-figures/>.

⁷ https://www.euopanu.nl/id/vl4dnlwdtyyc/nieuws/macron_vraagt_begrip_voor_behoud?ctx=vhcmeum177wk&tab=0.

⁸ https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_nl#documents.

⁹ IPCC, ‘Global warming of 1.5 °C’, Special Report, 2018, chapter 2.4.2.1.

¹⁰ Factsheet Prof. Dr W.C. Turkenburg, ‘Visies op de toekomst van kernenergie in de energietransitie’, Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

¹¹ Ministerie van EZK, ‘Beantwoording vragen rol kernenergie in energiemix’, 2019 (DGKE-E / 19005268).

¹² Ministerie van EZ&I, ‘Randvoorwaardenbrief kernenergie’, 11 feb. 2011, Kamerstuk 32 645, nr. 1.

In de brief worden de randvoorwaarden ook genoemd. Ze gaan over de veiligheid van kerncentrales, radioactief afval, ontmanteling, uraniumwinning en splijtstoffabricage, non-proliferatie, beveiliging en anti-terreurmaatregelen, kennisinfrastructuur en organisatie van de overheid, ruimtelijke ordening, locaties voor kerncentrales, maatschappelijke aspecten, procedurele aspecten en enkele overige aspecten (waaronder 'eisen te stellen aan de vergunninghouder').

Nederland en de Kernenergiewet

Het belangrijkste wettelijke kader voor nucleaire veiligheid en stralingsbescherming in Nederland is de Kernenergiewet (KEW) en de daarop gebaseerde regelgeving. De Kernenergiewet is een raamwet en kent twee belangrijke doelstellingen:¹³

- (i) Bevordering van een goede ontwikkeling op het gebied van de vrijmaking van kernenergie en de aanwending van radioactieve stoffen en ioniserende stralen uitzendende toestellen;
- (ii) Bescherming tegen de aan verwezenlijking van de eerste doelstelling verbonden gevaren;

De nucleaire sector in ons land beslaat vier domeinen: energie, medisch, materiaalkunde, en omgang met nucleaire materialen en faciliteiten. Volgens een studie uit 2016 biedt de sector jaarlijks werk aan 3100 fte en wordt een toegevoegde waarde geproduceerd van 0,8 tot 1,3 miljard euro per jaar.¹⁴

Het wettelijk kader omvat de gehele Nederlandse nucleaire sector. De sector omvat onder meer één kerncentrale die operationeel is (in Borssele), twee onderzoeksreactoren (in Delft en in Petten) waarmee naast het doen van onderzoek voornamelijk medische isotopen worden geproduceerd, een fabriek voor het verrijken van uranium en ander isotopen (in Almelo) en de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA in Nieuwdorp), zie figuur 2. Ook vervoer en toepassingen van radioactieve stoffen (medisch en niet-medisch) vallen onder het kernenergierecht, evenals het buiten gebruik nemen en ontmantelen van kerncentrales en nucleaire installaties. Zo is de Kerncentrale Dodewaard sinds 1997 'in veilige insluiting' buiten gebruik en zal deze vanaf 2045 volledig ontmanteld worden. Het sluiten van Kerncentrale Borssele staat uiterlijk per 2033 wettelijk op stapel.

¹³ C.N.J. Kortmann en A. Span (2019), 'De Kernenergiewet in vogelvlucht', M en R, 2 (2019) pp. 2-14.

¹⁴ Technopolis, 'Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland', Amsterdam, 18 juli 2016.



Figuur 2: Nucleaire installaties in Nederland¹⁵

Bevoegd gezag

Het bevoegd gezag op het gebied van kernenergie is de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS). Zij heeft onder de kernenergiewet een reeks van taken en bevoegdheden. Zo is zij op nucleair gebied verantwoordelijk voor het verlenen van vergunningen, het maken van veiligheidsbeoordelingen, de toezicht op het naleven van regelgeving, crisismanagement, publieksvoorlichting, (inter-)nationale samenwerking en het voorbereiden van en adviseren over wet- en regelgeving.¹⁶

De ANVS is in 2015 ontstaan uit een samenvoegen van verschillende diensten, als reactie op aanbevelingen van het Internationale Atoomenergieagentschap (IAEA). De samengevoegde partijen waren: de Kernfysische Dienst (KFD), de Programmadirectie Nucleaire Installaties en Veiligheid van het Ministerie van Economische Zaken, het Team Adviesnetwerken (nucleair) van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, en het Team Stralingsbescherming van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Sinds 2017 is de ANVS een zelfstandig bestuursorgaan, waar de minister van Milieu en Wonen namens het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) op toeziet en politiek verantwoordelijk voor is maar waaraan de ANVS hiërarchisch niet ondergeschikt is.¹⁷

Dankzij deze status is het belang van veiligheid en stralingsbescherming zo veel mogelijk losgekoppeld van andere belangen die hiermee kunnen conflicteren zoals economische belangen. Aanpalend is de minister van Financiën medeverantwoordelijk voor de goedkeuring van de financiële zekerheid voor de kosten van sluiting en ontmanteling van een kernreactor en de minister van Economische Zaken en Klimaat voor het kernenergiebeleid.¹⁸

Als zich een initiatiefnemer meldt voor de bouw van een kernreactor of kerncentrale op bijvoorbeeld de Maasvlakte, dan is het aan de initiatiefnemer planologisch mogelijk om

¹⁵ <https://magazines.autoriteitnvs.nl/anvs-jaarverslag/2017/01/nucleaire-veiligheid>.

¹⁶ C.N.J. Kortmann en A. Span (2019), 'De Kernenergiewet in vogelvlucht', M en R 2 (2019) pp. 2-14..

¹⁷ <https://www.autoriteitnvs.nl/over-ons/organisatie>.

¹⁸ C.N.J. Kortmann en A. Span (2019), 'De Kernenergiewet in vogelvlucht', M en R 2 (2019) pp. 2-14.

hiervoor conform het geldende bestemmingsplan een aanvraag in te dienen. De vergunning die onder de kernenergiewet is vereist heeft zowel betrekking op de inwerkingstelling en inwerkinghouding van de inrichting als op de buitengebruikstelling, de wijziging en de ontmanteling van de inrichting.

Waarborgingsbeleid Kernenergie

In de Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte is de structuurvisie Derde Structuurschema Energievoorziening (SEV III) opgenomen. Het ruimtelijke beleid en de ruimtebehoefte voor nationale elektriciteitsinfrastructuur is uitgewerkt in de SEV III en geborgd in het Besluit algemene regels ruimtelijke ordening (Barro)¹⁹. Dit betreft globale tracés van hoogspanningsverbindingen, bestaande en nieuwe vestigingsplaatsen voor elektriciteitsproductie en het waarborgingsbeleid kernenergie in Nederland. Het waarborgingsbeleid zorgt er voor dat er locaties beschikbaar blijven waar kerncentrales gebouwd zouden kunnen worden.²⁰ Het gaat hier om de locaties Eemshaven, Borssele en Maasvlakte I. Op deze locaties mogen geen ontwikkelingen plaatsvinden die de bouw van een kerncentrale onmogelijk maken of ernstig kunnen belemmeren. Het waarborgingsbeleid betekent uitdrukkelijk niet dat de SEV III uitspraken doet over nut en noodzaak van kernenergie en de daadwerkelijke bouw van kerncentrales.²¹ De SEV III zal onder de Omgevingswet opgaan in het Programma Energie Hoofdstructuur en de Nationale Omgevingsvisie.

De Plan-m.e.r. van het waarborgingsbeleid geeft inzicht in de randvoorwaarden, criteria en beoordelingen (zie tabel 1) op grond waarvan besloten is dat Maasvlakte I als vestigingsplaats voor een kerncentrale in aanmerking komt. Aandachtspunten voor deze locatie zijn, vanuit het globale niveau van de SEV III, de beschikking over voldoende koelwater (met de mogelijke noodzaak van koeltorens) en de beïnvloeding van de vispopulatie.

Voor de in tabel 1 gegeven beoordeling geldt dat de concrete milieugevolgen afhankelijk zijn van de vraag hoe een eventuele kerncentrale daadwerkelijk gebouwd wordt, hoeveel energie deze kan opwekken en welke mitigerende maatregelen er genomen worden.

Bij concrete projecten zal toetsing plaatsvinden mede op basis van een (inrichtings-)m.e.r. en conventionele milieuaspecten van de Wet milieubeheer (mensen, dieren, planten, goederen, water, bodem en lucht). Aan het toetsingskader van de Kernenergiewet liggen de beginselen rechtvaardiging, optimalisatie en dosislimitering ten grondslag. Dit houdt in dat voor zover de voorschriften aan de vergunning de nadelige gevolgen voor mensen, dieren, planten en goederen niet voorkomen, nadere voorschriften worden verbonden die de grootst mogelijke bescherming bieden, tenzij dat redelijkerwijs niet kan worden gevergd.

Provincies en gemeenten

In de bestaande ruimtelijk- juridische context hebben de provincies geen rol, hoewel zij wel vanuit ruimtelijke en externe veiligheidsoogpunt betrokken zullen zijn indien er een initiatief start op één van de aangewezen locaties. De provincie Zuid-Holland heeft geen specifiek beleid of regelgeving met betrekking tot kerncentrales. Gezien de aard en schaal van de ontwikkeling van een kerncentrale is het lastig om beleid te ontwikkelen dat dit bevordert of verbiedt.

¹⁹ Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 'Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte', Den Haag, 2012.

²⁰ Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III).

²¹ Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III).

randvoorwaarden en criteria	beoordeeld aan de hand van informatie over	Borssle	Eerns	Maaslake
Randvoorwaarden				
Ligging	De locatie ligt niet binnen 5 km van een dichtbevolkt gebied	2	2	2
Veiligheid	Preventieve en rampbestrijdingsmaatregelen moeten mogelijk en uitvoerbaar blijven	2	2	2
Criteria	In relatie tot een veilige bedrijfsvoering			
Weersomstandigheden	risico's voor stormen en tornado's, overstromingen en brand	1	2	2
	risico's voor aardverschuivingen, waterafvoer, aardbevingen en instortingen	2	1	2
Bodemstabiliteit	beschikbaarheid koelwater	2	2	1 à 2
Koelwater	risico's op explosies, o.b.v. aanwezigheid gevaarlijke bedrijven en routes gevaarlijke stoffen	1	1	1
Explosiegevaar vanaf land	neerstortingsgevaar van vliegtuigen	2	2	2
Neerstortingsgevaar	Transportmogelijkheden via weg, spoor, water	2	2	2
Transport				
	risico's door olierampen, o.b.v. ligging scheepvaartroutes, intensiteiten en het risico voor verspreiding in de richting van de locatie	1	1	1
Nautische veiligheid en gevaar door olierampen				
In relatie tot de beïnvloeding van de omgeving				
Straling	Dosisbelasting bevolking	2	2	2
Voedselketen	gebruik van bodem en water in omgeving	1	1	1
Algemene hinder	afstanden tot nabijgelegen woongebieden	2	2	2
	– Natura 2000-gebieden,			
	– ecologische hoofdstructuur			
	– weidevogel en ganzenfourageergebieden	1	1	1
Vernietiging of aantasting natuurlijke waarden en natuurgebieden				
Vernietiging van grote hoeveelheden (water) organismen	(water)-organismen nabij koelwaterinlaat	1	1	2
Bodem- en grondwater-verontreinigingen	– milieubeschermingsgebieden (inclusief grondwater- en bodembeschermingsgebieden)	2	2	2
	– kwel of inzijsituatie;			
	– richting en snelheid grondwaterstromingen	2	2	2
Verspreiding verontreinigingen				
Lozing koelwater op zoetwatervoorraad	oppervlaktewater, dat wordt gebruikt als zoetwatervoorraad	2	2	2
Mogelijkheden om koeltoren achterwege te kunnen laten	– aard en hoeveelheid koelwater in omgeving	2	2	1
Aantasting archeologie en cultuurhistorie	– aanwezigheid van archeologisch en cultuurhistorisch waardevolle gebieden en structuren	2	2	2
Aantasting landschappelijke waarden	– het landschap in de omgeving	1	1	2

Tabel 1. Milieugevolgen locaties waarborgingsbeleid kernenergie, gewaardeerd van 0 (slecht) tot 2 (goed).²²

In het verleden is gebleken dat provinciale of gemeentelijke regelgeving niet zonder meer regels mag bevatten met betrekking op kernenergie. Zo heeft de Raad van State in 2002 geoordeeld dat een algemeen verbod van kernafvalopslag in een streekplan van de provincie Groningen in strijd was met de Kernenergiewet, omdat dergelijke beslissingen volgens de wet door de betrokken ministers op nationaal niveau worden genomen en het bevorderen van de toepassing van kernenergie niet zomaar door lagere wetgeving verboden mag worden.²³

Overigens heeft op dit moment heeft geen van de provincies beleid ten aanzien van het gebruik van kernenergie in de energievoorziening. Wel steunt de provincie Noord-Holland via een lening de bouw van een nieuwe, kleine reactor in Petten ter vervanging van de bestaande reactor.

Techniek, stand van zaken en ontwikkelingen

Kernenergie komt vrij bij de splijting van zware instabiele atoomkernen. De energie wordt in een elektriciteitscentrale gebruikt om stoom te produceren waarmee vervolgens met behulp van een stoomturbine elektriciteit wordt gegenereerd. De gebruikelijke brandstof voor kernenergie is thans voornamelijk uranium. Dit element heeft de hoogste atoommassa die van nature op aarde voorkomt. Andere elementen die als grondstof voor het splijtingsproces

²² Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III).

²³ <https://www.raadvanstate.nl/@12179/200101743-1/>.

gebruikt kunnen worden zijn thorium (dat zelf niet splijtbaar is) en plutonium (dat ontstaat als uranium met neutronen wordt bestraald en zelf wel splijtbaar is).

Voor het produceren van elektriciteit met kernenergie worden vaak lichtwaterreactoren (LWR's) toegepast. Die hebben als splijtstof licht-verrijkt uranium nodig. In natuurlijk uranium zit 0,7% Uranium-235 en is de rest Uranium-238; bij licht-verrijkt uranium is het U-235 percentage verhoogd naar circa 3,5%. Dit heet verrijken. Het verrijken van uranium gebeurt onder andere met behulp van gascentrifuges. In Nederland vindt dit plaats bij het bedrijf URENCO te Almelo.

Uranium en Thorium

Uranium komt over de hele wereld voor in verschillende soorten gesteenten en in rivier- en zeewater. In veel gevallen gaat het om zeer lage concentraties die daarom niet gemakkelijk gewonnen kunnen worden. Alleen op een aantal plaatsen komt uranium in winbare concentraties voor. De winning van uranium vindt plaats via mijnbouw. Het uranium wordt uit het erts gehaald via chemische extractieprocessen. De beschikbaarheid van uranium wordt ingeschat op minimaal honderd jaar op basis van de huidige jaarlijkse consumptie, mede afhankelijk van de technologie die in de kernreactor wordt toegepast.²⁴

Thorium is een metaal dat eveneens voor het winnen van kernenergie kan worden ingezet. Het komt op aarde 3 tot 4 keer meer voor dan uranium.²⁵ Thorium bestaat volledig uit het isotoop Thorium-232. Dit isotoop is niet splijtbaar. Daarom kan het, in tegenstelling tot uranium en plutonium, niet direct als brandstof in een kernreactor functioneren. Daartoe moet het thorium, door absorptie van neutronen, eerst worden omgezet in het uraniumisotoop U-233, dat wel splijtbaar is.²⁶

Voor het opwekken van energie kan thorium op twee manieren worden benut: (1) in bestaande kernreactoren, in combinatie met uranium of plutonium als splijtstof, en (2) in typen reactoren die thans in ontwikkeling zijn, zoals een gesmoltenzoutreactor (Molten Salt Reactor, MSR), waarbij uranium of plutonium worden ingezet om de splijting op gang te brengen en de neutronen die hierbij ontstaan worden gebruikt om het niet-splijtbare thorium om te zetten in splijtbaar uranium. Omdat er bij de splijting van Uranium-233 veel minder hoogradioactieve en langlevende transuranen ontstaan zoals plutonium, produceert een kerncentrale die voornamelijk op thorium draait minder hoogradioactief kernafval. Wel ontstaan er in een thoriumcentrale enkele andere radioactieve isotopen die vanwege hun radioactiviteit en levensduur specifiek aandacht behoeven, zoals Protactinium-231, Thorium-229 en Uranium-230.²⁷

Een praktisch probleem van de gehele thoriumcyclus is dat deze cyclus nog vrijwel geheel ontwikkeld moet worden, inclusief de behandeling en opslag van alle radioactieve stoffen en componenten die hierbij ontstaan of worden gebruikt. Ook het verkrijgen van vergunningen kan hierdoor tijdrovend zijn.

Opwerking en Afval

Bij het splijtingsproces ontstaan splijtingsproducten die radioactief zijn. Ook komen er neutronen vrij. Die kunnen dan weer nieuwe splijtingen veroorzaken ('kettingreactie'). Ook kunnen neutronen door andere atoomkernen worden geabsorbeerd, waardoor er bijvoorbeeld Plutonium-239 wordt gevormd. Gebruikt splijtstof dat uit de reactor wordt gehaald bevat hier een mengsel van, en daarnaast splijtstof dat nog niet is verbruikt. Door

²⁴ H. Rogner et al., 'Energy Resources and Potentials', Global Energy Assessment, Cambridge University Press & IIASA, 2002, chapter 7.5.

²⁵ https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf.

²⁶ https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf.

²⁷ https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf.

opwerking kunnen de nuttige bestanddelen uit de gebruikte splijtstof worden gehaald en worden gebruikt. De kerncentrale in Borssele doet dat. Er blijft dan minder langlevend radioactief afval over. Bij veel andere kerncentrales in de wereld gebeurt opwerking niet, vanwege de kosten ervan en vanwege de proliferatie risico's van het plutonium dat bij opwerking uit de gebruikte splijtstof wordt gehaald.

Bij kernsplijting ontstaat hoog-, middel- en laagradioactief afval. De hoeveelheid hoogradioactief afval is hierbij in omvang beperkt maar de radioactiviteit en toxiciteit ervan zijn zeer schadelijk voor mens en milieu. Kernafval verliest zijn radioactiviteit door de straling die het afval uitzendt. Dat kan honderden tot duizenden jaren duren en als het afval isotopen zoals Plutonium-239 bevat zelfs een kwart tot een half miljoen jaar.

Bij de kerncentrales die thans wereldwijd draaien zit de splijtstof in splijtstofstaven. Deze staven worden gebundeld tot splijtstofelementen en in het reactorvat geplaatst. Na het gebruik in de reactor, vaak na drie jaar, worden de elementen weer uit het reactorvat gehaald en ter koeling tijdelijk in een waterbassin gezet. Daarna worden de elementen naar een opwerkingsfabriek gebracht of als radioactief afval integraal en langdurig bovengronds opgeslagen. Het radioactief afval dat uit de opwerkingsfabriek komt wordt in vaten verpakt en bovengronds opgeslagen. In Nederland vindt deze opslag bij de COVRA nabij Vlissingen plaats. Het is de bedoeling dat dit afval honderd jaar later ondergronds wordt opgeslagen. Hierbij wordt gedacht aan zoutlagen, kleilagen of rotsformaties. In Nederland wordt er studie van gemaakt, net als in andere landen.²⁸ Sommige landen, waaronder Finland, Frankrijk en Zweden, zijn met de realisatie van ondergrondse opslag van de afval al heel ver.²⁹

Wat betreft de veiligheid van een nieuw te bouwen kerncentrale moet in ons land het ontwerp volgens de 'Randvoorwaardenbrief Kernenergie' van 2011 voldoen aan de laatste stand van de techniek. Thans betreft dat de zogenaamde Generatie III reactoren (zie later). Daarnaast moet worden voldaan aan de technisch eisen die gelden op grond van Europese en Nederlandse regelgeving. Ook wordt geëist dat de kans op een kernsmeltongeval minder is dan eens in de miljoen jaar en dat de kerncentrale beschikt over een lange responstijd in het geval van ongevallen. Bovendien mag een ongeval zonder kernsmelting geen radiologische gevolgen voor de omgeving hebben.³⁰

Kernenergie en duurzaamheid

Nederland streeft naar een duurzame ontwikkeling van de economie en van het energiesysteem dat hierbij gebruikt wordt. Voor het gebruik van biomassa als energiebron zijn hiervoor duurzaamheidscriteria geformuleerd waaraan de winning en het gebruik van de biomassa moet voldoen. Al enige tijd is er discussie of ook voor de ontwikkeling en toepassing van kernenergie duurzaamheidscriteria zouden moeten gelden. Dit kan helpen de maatschappelijke acceptatie van het gebruik van kernenergie in de energievoorziening te bevorderen.

In 2007 kwam de milieubeweging in ons land, bij monde van Milieudefensie en de Stichting Natuur en Milieu, tot de volgende lijst van zes criteria³¹:

- 1) duurzame opties zoals energiebesparing en hernieuwbare energie moeten maximaal zijn benut;
- 2) er moet geen kans bestaan dat radioactieve stoffen zich bij een ongeluk buiten het reactorgebouw verspreiden - de reactor moet inherent veilig zijn;
- 3) radioactief afval dat in de gehele keten ontstaat mag maximaal 300 jaar gevaarlijk zijn;

²⁸ <https://www.covra.nl/app/uploads/2019/08/Opera-SafetyCase-samenvatting.pdf>.

²⁹ <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Foundation-stone-laid-for-Finnish-encapsulation-pl>.

³⁰ Ministerie van EZ&I, 'Randvoorwaardenbrief Kernenergie', 11 feb. 2011, Kamerstuk 32 645, nr. 1.

³¹ <https://www.ser.nl/nl/thema/energie-en-duurzaamheid/energieakkoord/-/media/BE04ACF236B54881A524925A775D70A2.ashx>.

- 4) eindberging van radioactief afval moet operationeel zijn op moment van ingebruikname van de reactor;
- 5) er mag geen splijtstof ontstaan dat geschikt is voor aanmaak van kernwapens;
- 6) alle (externe) kosten dienen verdisconteerd te worden.

Internationaal spelen dit type doelstellingen een rol bij het onderzoek naar en de ontwikkeling van een nieuwe generatie kernreactoren.³² De onderzoeksprogramma's die op dit gebied lopen hebben daarnaast als doel dat de nieuw te ontwikkelen reactoren bijdragen aan het verlagen van de bouw- en financieringskosten van kerncentrales.

Typen kernreactoren

Er bestaan tientallen typen kernreactoren, en nog eens vele tientallen typen zijn in ontwikkeling of onderzoek. Om het onderscheid tussen al deze typen wat behapbaar te maken worden diverse classificaties toegepast. Zo'n classificatie kan dan bijvoorbeeld betrekking hebben op het doel van de reactor (onderzoeksreactor, isotoopenreactor, energiereactor), de snelheid van de neutronen die in het splijtingsproces worden gebruikt (snelle reactor, thermische reactor), op het koelmiddel of de moderator die wordt gebruikt (lichtwaterreactor, zwaarwaterreactor, gasgekoelde reactor, natrium gekoelde reactor, grafietreactor), op de druk die in de reactor wordt toegepast (drukwaterreactor, kokendwaterreactor) of op het vermogen dat de reactor kan leveren (klein: 50-300 MWe; middelgroot: 300-600 MWe, groot: 600-1700 MWe). In een andere indeling, die tegenwoordig veel wordt gebruikt, wordt over 'reactorgeneraties' gesproken. Meestal worden dan vier generaties onderscheiden.

Eerste en tweede generatie reactoren

Eerste en tweede generatie reactoren werden na de Tweede Wereldoorlog ontwikkeld en toegepast voor onder meer de aandrijving van onderzeeboten en het produceren van elektriciteit in energiecentrales. De eerste generatie reactoren werd tot ongeveer 1965 gebouwd, vaak als demonstratie. Reactoren zoals in Borssele, Doel en Tihange behoren tot de tweede generatie, net als vrijwel alle andere kernreactoren die thans wereldwijd voor energieopwekking draaien. Veel van deze reactoren zijn thans nabij het einde van hun geplande levensduur.

Derde generatie reactoren

De kernreactoren die heden ten dage nieuw worden gebouwd, behoren over het algemeen tot Generatie III of III+. In Europa zijn thans drie van deze reactoren in aanbouw onder de naam European Pressurized Reactor (EPR).³³ De EPR, een drukwaterreactor, is ontwikkeld door EDF (Électricité de France) en Areva, beide grotendeels in handen van de Franse staat. De bouwtijd van deze drie reactoren is waarschijnlijk 10-15 jaar. De Generatie III centrales zijn veiliger dan de centrales van Generatie II, maar ook ingewikkelder en duurder om te bouwen, zo blijkt tot op heden uit de Europese praktijk. De bouwtijd van de twee EPR-reactoren die recent in China zijn opgeleverd, was echter ruwweg 7,5 jaar. De kosten van de EPR zijn in Europa 5000 tot 7000 euro per kWe (zie tabel 2), maar in China fors lager. Redenen voor relatief hoge bouwkosten zijn onder andere: hoge technische/veiligheidseisen, tekort aan kennis over uitvoering van grote projecten, gebrek aan ervaring, kwetsbare processen bij toeleveranciers, en de noodzaak van een hoge specialisatiegraad.

³² https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40472/generation-iv-goals.

³³ 3^{de} generatie Hoge druk reactor, https://nl.wikipedia.org/wiki/European_Pressurized_Reactor.

Land en plaats		Kenmerken
Verenigd Koninkrijk, Somerset ³⁴		- Naam: Hinkley Point C - 2 reactoren, 3200 MWe - Bouwkosten ca. 27 miljard euro - Start bouw: 2014 - Geplande oplevering 2025 - Garantieprijs 11 cent/kwh
Finland, Olkiluoto ³⁵		- Naam: Olkiluoto Nuclear Power Plant - 1 reactor, 1600 MWe - Bouwkosten ca. 11 miljard euro - Start bouw 2005 - Geplande oplevering 2021 (meerdere keren uitgesteld)
Frankrijk, Flamanville ³⁶		- Naam: Flamanville Nuclear Power Plant - 1 reactor, 1600 MWe - Bouwkosten ca. 12,4 miljard euro - Start bouw 2007 - Geplande oplevering 2022 (meerdere keren uitgesteld)

Tabel 2. Kenmerken van de Generatie III reactoren die in aanbouw zijn in Europa.

Er zijn mondiaal ook een aantal waarvan de bouw wegens kostenoverschrijding is stopgezet.³⁷

Vierde generatie reactoren

Inmiddels wordt gewerkt aan de ontwikkeling van Generatie IV kernreactoren. Het ontwerpen, onderzoeken en bewijzen van de technologie maar ook het bouwen en veilig in productie brengen van deze nieuwe reactoren kost veel geld en ook veel tijd, mede door het vergunningentraject dat moet worden doorlopen. Zelfs met sterke verhoging van de onderzoeksbudgetten kunnen Generatie IV reactoren daarom pas naar verwachting rond 2050 op grote schaal worden ingezet.³⁸

Binnen de verzamelnaam 'Generatie IV' bestaan heel veel verschillende concepten, ieder met een andere mate van 'market readiness'. Bij al deze concepten gaat het steeds om toepassing van kernsplijting (dus niet om kernfusie). Er kan een verdeling worden gemaakt tussen 'thermische reactoren' en 'snelle reactoren'.

Hieronder volgt een weergave van de meest gangbare modellen. Daarnaast wordt stilgestaan bij de ontwikkeling van kleine en middelgrote reactoren die soms ook modulair

³⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Hinkley_Point_C_nuclear_power_station.

³⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Olkiluoto_Nuclear_Power_Plant.

³⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Flamanville_Nuclear_Power_Plant.

³⁷ Bijvoorbeeld twee projecten in South Carolina, die na 40% bouw zijn stilgelegd ; <https://seekingalpha.com/pr/16901340-south-carolina-electric-gas-company-to-cease-construction-and-will-file-plan-of-abandonment>

³⁸ Factsheet B. van de Zwaan , 'Kernenergie in de praktijk', Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

kunnen worden gebouwd (SMR's). Tenslotte wordt de ontwikkeling van kernfusie, een geheel andere technologie, voor de volledigheid kort besproken.

Ter promotie van de ontwikkeling van Generatie IV reactoren heeft de VS in 2000 het Generation IV International Forum (afgekort GIF) opgericht waarbij tenminste 14 landen, inclusief de EU, zijn betrokken. Sinds 2019 is ook het Canadese bedrijf Terrestrial Energy bij het GIF aangesloten.³⁹

In 2002 selecteerde dit forum zes reactortechnologieën waarop zij de aandacht primair wilde richten en waarvoor ongeveer 6 miljard dollar werd uitgetrokken voor een periode van 15 jaar. Ongeveer 80% van dit bedrag zou hierbij komen uit bijdragen van de VS, Japan en Frankrijk.

Vier van de zes reactortechnologieën werken met snelle neutronen, en twee met langzame neutronen net zoals bij huidige kernreactoren zoals BWR, PWR en EPR. De grootte van de ontwerpen varieert van 150 tot 1500 MWe. De ontwerpen werken met een hogere temperatuur dan bestaande reactoren. Door de hoge temperaturen kunnen vier van de ontwerpen ook worden gebruikt voor het thermochemisch produceren van waterstof.

De zes ontwerpen zijn: (1) de Very High Temperature Reactor (VHTR); (2) de Molten Salt Reactor (MSR); (3) de Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR); (4) de Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), (5) de Gas-cooled Fast Reactor (GFR); en (6) de Lead-cooled Fast Reactor (LFR).

In het verlengde hiervan lanceerde de Europese Commissie in 2010 het European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) ter ontwikkeling van met name de SFR, GFR en LFR technologie. De totale kosten van ESNII zijn begroot op ruim 10 miljard euro.⁴⁰ Daarnaast heeft de Europese Commissie ook enig geld uitgetrokken voor het bestuderen van de gesmoltenzoutreactor (MSR), in Nederland in de volksmond vaak 'de thoriumreactor' genoemd.⁴¹

Molten Salt Reactor (MSR)

De MSR is een hoge temperatuur reactor en gebruikt gesmolten fluoridezout als koelmiddel. Van dit type reactor bestaan thans, op hoofdlijnen, twee varianten. In de ene ('normale') variant is de brandstof (uranium en thorium) opgelost in het koelmiddel. In de andere variant zit de brandstof in grafietbolletjes of in splijtstofelementen. Er zijn en worden van de MSR meerdere prototypes ontwikkeld of gebouwd. Op dit moment bouwt China twee typen MSR-reactoren. Het is thans niet de verwachting dat deze ontwerpen vóór 2050 op commerciële wijze elders in de wereld stroom aan het net zullen leveren.

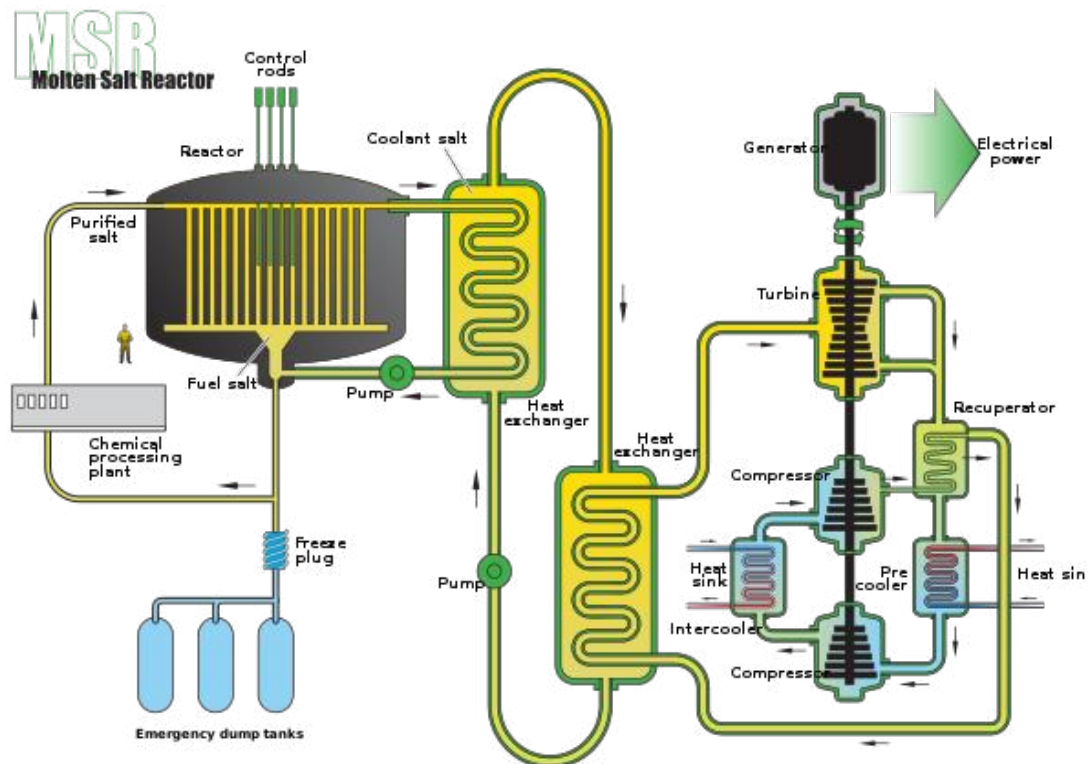
Gesmolten zout kent een aantal inherente uitdagingen, met name vanwege de hoge corrosiviteit van het zout. Bij het 'normale' ontwerp (zie figuur 3) circuleert het zout waarin de splijtstof is opgelost permanent door de reactor. De brandstof moet steeds aan het mengsel worden toegevoegd. Wanneer dit thorium is, wordt dit in de reactor omgezet in Uranium-233 waarna het verspleten kan worden. De splijttingsproducten moeten continu uit het mengsel worden verwijderd, deels om te voorkomen dat koelkanalen dichtslibben. De reactor moet met Uranium-235 als splijtstof worden opgestart. Vanwege onder meer de complexiteit en de radioactieve vervuiling en belasting die binnen de gehele reactor optreedt, zijn sommige experts kritisch op de kansen van dit ontwerp. Bij de Technische Universiteit Delft en bij NRG in Petten wordt naar vooral deze variant onderzoek gedaan. In Delft worden de veiligheid van de reactor en de fysische eigenschappen van het zout onderzocht en in Petten de reactiviteit van gesmolten zout. Het onderzoek moet bruikbare informatie

³⁹ <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>.

⁴⁰ <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>.

⁴¹ <http://www.nuclearenergy.test.polimi.it/samosafer/>.

opleveren voor onder meer de twee Chinese gesmoltenzoutreactoren die thans in aanbouw zijn.



Figuur 3: Conceptueel schema voor een MSR.⁴²

Een voordeel van de MSR is het potentiële opbranden van de zware atoomkernen die in het kernafval zitten. Bij het gebruik van thorium als brandstof wordt bovendien naar verhouding heel weinig radioactief afval met een levensduur van enkele honderdduizenden jaren geproduceerd. De radiotoxiciteit van het hoog-actieve afval zal daarom naar verwachting binnen 300 jaar tot een zeer laag niveau zijn gedaald.

Een ander voordeel is dat, volgens de theorie, bijna 100% van de brandstof in een MSR kan worden gebruikt voor energieproductie. Dat is aanzienlijk meer dan bij de huidige generatie kernreactoren.

Tenslotte is een voordeel dat de reactor met lage drukken werkt, relatief weinig splijtstof bevat en – last but not least - inherent veilig is, dus volgens de huidige inzichten niet kan smelten of ontploffen.

Stable Salt reactor

Een variant van de MSR waarbij de brandstof niet is opgelost in het zout maar in splijtstofelementen zit (waarin ook zout zit), is de Stable Salt reactor (SSR). Dit type wordt door Molten, een commercieel bedrijf in Canada, ontwikkeld. Daarbij werkt het bedrijf nauw samen met onderzoekers in de UK.

Het SSR-ontwerp komt tegemoet aan enkele bezwaren die aan de 'normale' MSR kleven, zoals eerder genoemd. Daarbij lijkt ook deze reactor inherent veilig te zijn. Daarnaast zouden onderdelen modulair gemaakt en getransporteerd kunnen worden. Een kerncentrale

⁴² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Molten_Salt_Reactor.svg.

zou daardoor goedkoper te bouwen zijn. Het ontwerp verenigt bestaande technologie uit huidige generatie 3 reactoren met de bewezen onderdelen van de MSR-technologie. Daarbij komt dat in theorie ook oud kerafval, dat nog niet is opgewerkt, als brandstof gebruikt zou kunnen worden. Vanwege al deze factoren wordt Moltex bij de ontwikkeling van de SSR gesteund door CNL, het onderzoeksinstituut voor kernenergie in Canada.⁴³ Ook het Amerikaanse Department of Energy draagt financieel bij aan de ontwikkeling van het concept.⁴⁴

Snelle kweekreactoren (Fast Breeders)

In snelle reactoren kan plutonium worden verspleten. Dit plutonium ontstaat wanneer het isotoop Uranium-238 wordt bestraald met neutronen. Door absorptie van neutronen verandert Uranium-238 in Plutonium-239. Dit gebeurt in de kerncentrale; je 'kweekt' bij de versplijting nieuwe splijtstof. Omdat natuurlijk uranium voor 99,3% uit het isotoop Uranium-238 bestaat, zou hierdoor 50 tot 100 keer meer energie uit een kilogram uranium gewonnen kunnen worden.

De kweektechnologie dateert al uit de Tweede Wereldoorlog. Zo was de atoombom op Nagasaki een plutoniumbom. Aan de ontwikkeling van snelle (kweek)reactoren is in de jaren vijftig, zestig en zeventig op vele plaatsen in de wereld gewerkt, waaronder in Kalkar (Duitsland) waarbij ook Nederland was betrokken. Doordat de uitbouw van het kernvermogen na het kernongeluk in Harrisburg (VS) en zeker na de kernramp in Tsjernobyl minder snel verliep dan verwacht en er voldoende uranium voor een reeks van jaren beschikbaar bleek, werd de ontwikkeling niet krachtig doorgezet. Daarbij speelde ook een rol dat snelle kweekreactoren duurder waren dan thermische reactoren en het gebruik van natrium als koelmiddel niet zonder problemen was.

Bij de ontwikkeling van Generatie IV reactoren wordt opnieuw naar snelle kweekreactoren ('fast breeders') gekeken. In een 'snelle reactor' worden de neutronen die bij kernsplijting vrijkomen gebruikt zonder ze eerst af te remmen. Dergelijke snelle neutronen kunnen overigens ook worden gebruikt om het niet-splijtbare thorium om te zetten in splijtbaar Uranium-233.⁴⁵

In de Europese Unie gaat het grootste deel (circa 5 miljard euro) van het geld dat binnen het ESNII-programma beschikbaar is naar de natrium-gekoelde vorm van deze technologie.⁴⁶

In respectievelijk Rusland en India bestaat thans een derde generatie reactor van dit type natriumgekoelde reactor, te weten de BN-800 in Rusland en de PFBR-500 in India. Deze worden dóórontwikkeld naar vierde generatie met als hoofddoelen: kostendaling, efficiënter gebruik van uranium en vermindering van hoog-actief afval. Bij deze ontwikkeling zijn naast de Europese Unie (en Euratom) ook China, Frankrijk, Japan, Korea en de VS betrokken. Een van de aandachtspunten in het lopende onderzoek is de veiligheid van de reactor bij wegvallen van de koeling.

Very High Temperature Reactor (VHTR)

Het gaat bij de VHTR om een hoge-temperatuurreactor die met gas (helium) wordt gekoeld en voor splijting thermische neutronen gebruikt. Als moderator – de stof die de snelle neutronen moet afremmen – wordt grafiet gebruikt. De ontwikkeling van de VHTR bouwt voort op de kennis en ervaring die verschillende landen – met name Duitsland, Japan, de VS, Rusland, China en Zuid-Afrika – hebben opgedaan bij de ontwikkeling en toepassing van

⁴³ <https://www.cnl.ca/en/home/news-and-publications/news-releases/2019-news-releases/20191118.aspx>.

⁴⁴ <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-federal-funding-granted-for-SSR-technology-deve>.

⁴⁵ <http://www cea.fr/multimedia/Documents/infographies/Defis-du-CEA-infographie-reacteur-neutrons-rapides.pdf>.

⁴⁶ <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>.

een of meerdere uitvoeringen van de Hoge Temperatuur Gasgekoelde Reactor (HTGR) en Pebble Bed Reactor (PBR). De reactor moet een grootte van circa 600 MWth krijgen en onder meer waterstof en hoge temperatuur stoom voor de industrie gaan produceren. Bij de ontwikkeling van dit concept zijn vooral Euratom, Frankrijk, Japan, China, Korea, Zwitserland, de VS en Australië betrokken. De bouw in China van een demonstratiereactor (de HTR-PM) is al ver gevorderd en moet de weg bereiden naar een commerciële versie van de VHTR.⁴⁷

Super critical water cooled reactor (SCWR)

De SCWR is een ontwerp waarbij met zeer hoge drukken en ook een hoge temperatuur in de reactorkern wordt gewerkt. Hierdoor hoopt men een energetisch omzettingrendement (van warmte in elektriciteit) te bereiken die een-derde hoger is dan het omzettingsrendement van bestaande lichtwaterreactoren. Ook is er in de SCWR geen secundair stoomcircuit. Dit moet de kerncentrale simpeler maken en de geleverde energie goedkoper. De veiligheid van de reactor lijkt sterk op die van een Generatie III kokendwaterreactor (BWR): er is sprake van 'passieve veiligheid' maar niet van 'inherente veiligheid'. Verschillende uitvoeringen van het concept worden in diverse landen onderzocht, met name in Canada, Japan, Rusland en China. Hierbij is ook Euratom betrokken. Thans wordt onder meer gewerkt aan de bouw van een demonstratiereactor met een vermogen van 30 tot 150 MWe.⁴⁸

Kleine, modulaire reactoren (SMR)

De term SMR heeft in de kernenergiewereld twee betekenissen. De ene is 'Small and Medium sized Reactors', de andere 'Small Modular Reactor'. De term 'klein' wordt gebruikt wanneer het vermogen 50 tot 300 MWe bedraagt en de term 'middelgroot' wanneer het vermogen 300 tot 600 MWe is. Deze indeling volgend is de reactor in Borssele dus middelgroot, want het vermogen is 485 MWe.

Het aantal ontwerpen voor een eventueel te bouwen SMR dat wereldwijd is gemaakt is buitengewoon groot. Het gaat om vele tientallen. Het geven van een goed overzicht van deze ontwerpen is in deze notitie niet mogelijk. Voor kleine en ook geavanceerde reactoren is zo'n overzicht wel elders te vinden.^{49,50}

Bij 'kleine en geavanceerde reactoren' gaat het veelal om Generatie III ontwerpen, maar ook om Generatie IV concepten. Door reactoren kleiner te maken, en aldus de investeringskosten voor de bouw van een kerncentrale te verlagen, hoopt men makkelijker toegang tot de markt te krijgen. Daarbij wordt ook gedacht aan toepassingen in de industrie, in de gebouwde omgeving en op plekken zonder geavanceerd elektriciteitsnet. Door een modulaire opzet hoopt men de reactor in veelvoud te kunnen produceren en de bouwtijd van een kerncentrale te verkorten. Aldus moeten de kosten, zowel per kW als per kWh, worden verlaagd.

Alle ontwerpen hebben een hoge mate van 'passieve veiligheid', een aantal ook 'inherente veiligheid'. Bij passieve veiligheid gaat het om mechanismen die – zonder menselijk ingrijpen – in werking worden gezet als een uit de hand lopen van de kettingreactie in de reactorkern of het wegvallen van de koeling van de reactor dreigt. Bij inherente veiligheid is het om fysische redenen niet mogelijk dat de kettingreactie uit de hand loopt en er een explosie of vermogens excursie optreedt. Ook is het om fysische redenen niet mogelijk dat de reactorkern geheel of gedeeltelijk smelt als de koeling wegvalt.

⁴⁷ <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>.

⁴⁸ <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>.

⁴⁹ <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.

⁵⁰ <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>.

Bij kleine reactoren wordt in aanvulling ook vaak gedacht aan “bouwen onder de grond”, om de kwetsbaarheid voor terroristische aanslagen te verkleinen.

Ontwerpen die in Nederland recent in het nieuws kwamen waren - naast de al eerder besproken ‘thoriumreactor’ - de zogenaamde Rolls Royce reactor en de NuScale reactor.

Bij Rolls Royce gaat het om een reactor die werkt ‘op basis van bewezen technologie’ en een vermogen heeft van circa 440 MWe. Het is dus een reactor van middelbare grootte. Het bedrijf hoopt het eerste exemplaar in circa 2030 in de UK in bedrijf te kunnen stellen en daar vervolgens wereldwijd een markt voor te vinden.⁵¹

Bij de NuScale reactor gaat het om een reactor van 50 MWe die modulair kan worden toegepast. Door 12 van deze eenheden bij elkaar te zetten, hoopt de ontwikkelaar - het bedrijf NuScale Power - kerncentrales van 600 MWe tegen relatief lage kosten te kunnen bouwen. NuScale Power zelf is een jong bedrijf (opgericht in 2007) en heeft met het bouwen van kerncentrales geen ervaring. Aan de realisatie van de eerste reactor wordt thans in Idaho (VS) gewerkt. Sinds 2008 praat het bedrijf met de NRC (Nuclear Regulatory Commission) in de VS over de vergunningverlening hiervoor. De eerste die nodig is recent door de NRC afgegeven. De schattingen voor de investeringskosten van een in de VS te bouwen NuScale-centrale van 600 MWe bedragen thans ca. 5000 US\$ per kWe. De tijd moet leren of dit daadwerkelijk wordt gerealiseerd. Een vraag is vervolgens of deze prijs ook voor West-Europa geldt en dan voldoende concurrerend is.⁵²

Kernfusie

Kernfusie is het samensmelten van twee (lichte) atoomkernen, bijvoorbeeld deuterium (H-2) en tritium (H-3) waarbij in dit geval helium en een neutron ontstaat maar daarnaast ook energie welke voor het opwekken van elektriciteit kan worden benut. De zon werkt op kernfusie en de energie hiervan komt in de vorm van licht en warmte op het aardoppervlak. Aan de ontwikkeling van een commercieel werkende kernfusiereactor op aarde wordt sinds de jaren '50 wereldwijd gewerkt. De verwachting is momenteel dat het nog wel 50 tot 80 jaar duurt voordat het inzetten van zo'n reactor in onze energievoorziening wellicht werkelijkheid wordt.

Vergeleken met kernsplijting is kernfusie een veel schonere bron van energie en bijna ook onbeperkt wat betreft de energievoorraad. De uitvoering van het idee is echter ingewikkeld en duur. Het verkeert daarom nog steeds in de fase van onderzoek en ontwikkeling. Het bekendste project op dit gebied is ITER, een wereldwijd initiatief waarin 35 landen samenwerken om te bewijzen dat kernfusie op aarde daadwerkelijk als energiebron kan worden gebruikt. ITER is bedoeld om de wetenschappelijke en technische haalbaarheid van kernfusie op grote schaal te demonstreren. Met de bouw van ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) is in 2010 in het Zuid-Franse Cadarache begonnen. Einde 2019 hebben de verantwoordelijken voor ITER officieel medegedeeld dat 65% van alle activiteiten die in deze fase gepland waren ook zijn uitgevoerd.

De totale bouwkosten van ITER werden in 2001 geschat op 5 miljard euro. Inmiddels is dit bedrag enkele malen over de kop gegaan.⁵³ Naast ITER zijn er ook een aantal andere kernfusie-onderzoeksprojecten.⁵⁴

Kosten kernenergie

De economische kosten van energieprojecten zijn in het algemeen driedig:

⁵¹ <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Rolls-Royce-sees-SMRs-on-UK-grid-by-2029>.

⁵² https://en.wikipedia.org/wiki/NuScale_Power; <https://www.linkedin.com/in/wim-turkenburg-3539b8a8/detail/recent-activity/>.

⁵³ <https://www.iter.org/proj/inafewlines>.

⁵⁴ <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx>.

- 1) de bouwkosten (alle kosten die nodig zijn om het project te voltooien),
- 2) de exploitatiekosten (bediening- en onderhoudskosten en brandstofkosten), en
- 3) de ontmantelingskosten (de kosten die gemaakt moeten worden om alle installaties weer te verwijderen en het terrein in maagdelijke staat op te leveren).

Daarnaast zijn aan veel energieprojecten ook maatschappelijke kosten verbonden die lang niet altijd in de energieprijs tot uitdrukking worden gebracht.

Vergeleken met aardgasgestookte centrales kennen kerncentrales relatief hoge investeringskosten maar lage brandstofkosten. Een gevolg hiervan is dat kerncentrales in de elektriciteitsvoorziening tot op heden vooral worden ingezet voor het dekken van de basislast in de elektriciteitsvraag en aardgascentrales vooral voor het dekken van de middenlast en pieklast in deze vraag. Dat betekent overigens niet dat kerncentrales niet regelbaar zouden zijn.⁵⁵

De kosten van de bouw van een kerncentrale zijn afhankelijk van veel factoren. Een deel daarvan is technisch (veel beton, technische expertise en kennis van grote projecten), een deel politiek (vergunningen, veiligheid, invloed publieke opinie), en een deel organisatorisch (samenwerking tussen alle betrokken partijen, kwetsbare processen bij toeleveranciers door een hoge specialisatiegraad). Ook speelt de duur van de bouw een rol, vanwege bouwrenteverlies.

De bouwkosten van een EPR (European Pressurized Reactor) centrale bedragen thans in Europa 5000 tot 7000 euro per kWe (zie tabel 2). Bovenop de bouwkosten komen nog kosten voor financiering die uiteen kunnen lopen van 8 tot 80% van de constructiekosten afhankelijk van de bouwtijd. Het lijkt volgens het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat daarom, al met al, niet onredelijk om uit te gaan van bouwkosten tussen de 8 en 10 miljard euro voor een centrale van 1000 MW.⁵⁶ In China, waar thans twee EPR's draaien, heeft men de reactor volgens zeggen overigens voor een fors lagere prijs kunnen bouwen. Een van de redenen hiervoor is dat men de bouwtijd tot circa 88 maanden heeft weten te beperken.⁵⁷

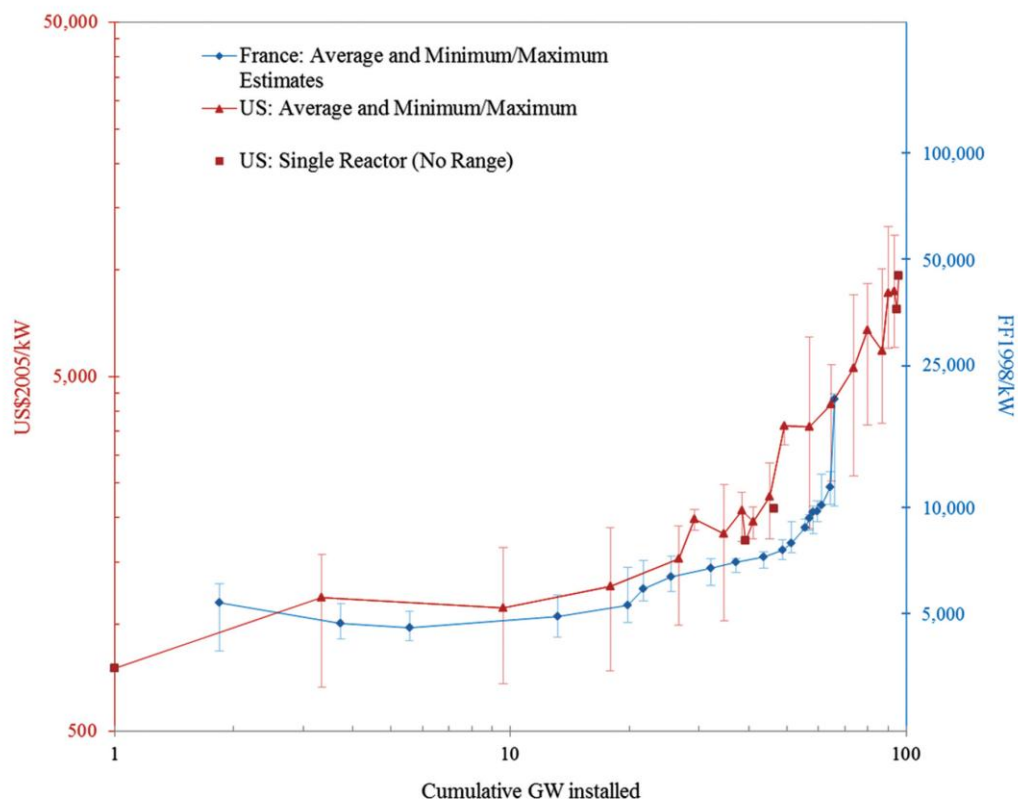
Hoe de totale constructiekosten (dus inclusief bouwrenteverlies) van kerncentrales zich in Frankrijk en de VS in de loop der tijd hebben ontwikkeld staat, als functie van het cumulatief geïnstalleerd vermogen, weergegeven in figuur 4. De figuur laat, anders dan bij zonnecellen en windturbines, een toename van deze kosten zien naarmate er meer kerncentrales werden gebouwd. Een van de redenen hiervoor is dat er steeds strengere eisen aan de veiligheid van de centrales zijn gesteld. Andere redenen zijn het gebrek aan standaardisatie, de steeds hogere kwaliteitseisen die gesteld worden, gebrek aan ervaring van partijen die de bouw moeten uitvoeren, en het optreden van vertragingen in de bouw.⁵⁸

⁵⁵ Factsheet Prof. Dr Ir J.L. Kloosterman, 'Kernenergie in een CO2-vrije energiemix', Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

⁵⁶ Ministerie van EZK, 'Beantwoording vragen rol kernenergie in energiemix', 2019 (DGKE-E / 19005268).

⁵⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Taishan_Nuclear_Power_Plant.

⁵⁸ F. von Hippel et al., 'Nuclear Energy', Global Energy Assessment, Cambridge University Press & IIASA, 2012, chapter 14.



Figuur 4: De installatiekosten (bouwkosten inclusief bouwrenteverlies) van kerncentrales in Frankrijk (vanaf 1998) en de VS (vanaf 1979), in US\$ per kWe.⁵⁹

Voor wat betreft het dekken van de kosten van de ontmanteling van een kerncentrale gelden in Nederland onder meer de volgende bepalingen⁶⁰:

- 1) Voor alle kosten van de ontmanteling is de vergunninghouder verantwoordelijk.
- 2) De vergunninghouder moet beschikken over een voorziening die is goedgekeurd door de ministers van EZK en Financiën.
- 3) De voorziening moet een dusdanige waarborg bieden dat vanaf de ingebruikname van de centrale de kosten van buitengebruikstelling en ontmanteling voor 100% zijn gedekt op het moment dat deze nodig zijn.

De schattingen van de kosten van ontmanteling lopen in de literatuur zeer uiteen. De ervaringen zijn zeer divers. Ruwweg kunnen de ontmantelingskosten op zo'n 30% van de investeringskosten worden geschat.

Ondanks de hoge bouwkosten kunnen kerncentrales in specifieke landen en onder de juiste omstandigheden, en in principe ook in Nederland, een concurrerende optie voor elektriciteitsproductie zijn, met productiekosten van 6,5 tot 12 (2017) cent per kWh. De bandbreedte in deze kosten wordt mede bepaald door de veronderstelde levensduur van kerncentrales, de beschikbaarheids- en belastingfactor van de centrale, en de discontovoet. Kernenergie kan concurrerder worden door factoren als massafabricage, schaalgrootte, verdere vergroting van de levensduur van de reactoren, en financiële risicobeheersing.⁶¹

⁵⁹ F. von Hippel et al, 'Nuclear Energy', Global Energy Assessment, Cambridge University Press & IIASA, 2012, chapter 14, figure 14.11.

⁶⁰ Ministerie van EZ&I, 'Randvoorwaardenbrief Kernenergie', 11 feb. 2011, Kamerstuk 32 645, nr. 1.

⁶¹ Factsheet Prof. Dr B. van der Zwaan, 'Kernenergie in de praktijk', Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

Voor EPR-centrale die thans in Hinkley Point (UK) wordt gebouwd heeft de Britse overheid voor 35 jaar een garantieprijs van 11 cent per kWh afgegeven.⁶² Ter vergelijking: het laatst vergunde windpark in Nederland rekent met ongeveer 4,3 cent/kWh. Zon-PV ligt thans tussen de 5 en de 8 cent/kWh. Wel moet meteen worden aangetekend dat zo'n vergelijking op de kWh-prijs tussen enerzijds kernenergie en anderzijds zonne- en windenergie niet het volledige beeld geeft. Zon- en windvermogen niet altijd beschikbaar, terwijl dit voor kerncentrales doorgaans voor zo'n 95% van de tijd wel het geval is. Bij gebruik van zon- en windvermogen moet dus meer back-up vermogen beschikbaar zijn dan wanneer er kerncentrales worden gebruikt.

Tot slot zijn er maatschappelijke kosten. Bij het gebruik van fossiele brandstoffen zijn dat bijvoorbeeld de kosten van klimaatverandering en milieuvervuiling door de uitstoot van verbrandingsproducten. Bij kernenergie zijn de kosten deze onder te verdelen in (1) kosten en risico's bij een ongeval zoals Tsjernobyl of Fukushima die door de samenleving moeten worden gedragen, en (2) de kosten die gemaakt moeten worden om het ontstane afval zo veilig mogelijk af te voeren en op te slaan, voor zover deze kosten niet al bij de energieopwekking in rekening zijn gebracht. Daarnaast kunnen er kosten zijn vanwege (3) het instandhouden van de organisatie, het kennisniveau en de infrastructuur die nodig zijn om van de technologie een modern, optimaal, en maatschappelijk acceptabel gebruik te kunnen maken.

Mogelijke rol van kernenergie in de toekomstige energiemix

Een CO₂-vrije energievoorziening bestaat in de meeste scenario's uit een mix van:

- i. Vermogen dat gebruik maakt van variabel beschikbare hernieuwbare energiebronnen (met name zon en wind) en beperkt regelbaar is, maar wel tegen lage marginale kosten kan produceren.
- ii. Regelbaar vermogen dat in beginsel op afroep beschikbaar is en geen of weinig uitstoot van broeikasgassen heeft, zoals waterkrachtcentrales, gascentrales met CO₂-afvang en opslag (CCS), biomassacentrales met of zonder CCS, en kerncentrales.
- iii. Opslagsystemen voor energie, zoals warmte- en koudeopslagsystemen, verschillende typen accu's, pompaccumulatiecentrales en waterstofsysteem voor het opvangen van weer- en seizoensgebonden variaties.

Een aantal scenariostudies laten zien dat energiesystemen mét kernenergie kunnen leiden tot een lagere gemiddelde kostprijs van elektriciteit dan systemen zonder kernenergie. Tevens is denkbaar dat kernenergie een rol kan spelen bij de productie van hogetemperatuurwarmte voor de industrie en ook bij waterstofproductie.

Het Copernicus Instituut van de Universiteit Utrecht heeft een rekenmodel ontwikkeld waarmee de vraag naar, en het aanbod van elektriciteit in (regio's van) Europa van uur tot uur kan worden gesimuleerd. Met dit model kan het ontwerp van het elektriciteitssysteem worden geoptimaliseerd. Het rekenmodel maakt het mogelijk de noodzaak en economische aantrekkelijkheid van de nieuwbouw van kerncentrales te onderzoeken in concurrentie met andere opties. Recent heeft de Utrechtse groep onderzocht welk elektriciteitssysteem in West-Europa, met enige toespitsing op Nederland, in 2050 tot nul-emissie van CO₂ kan leiden tegen naar verwachting zo laag mogelijke kosten en ook met behoud van de thans bestaande betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening. De uitkomsten staan beschreven in een artikel dat november 2019 in het wetenschappelijke tijdschrift *Applied Energy* is gepubliceerd.⁶³ Toegespitst op het gebruik van kernenergie staan de resultaten

⁶² <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Hinkley-Point-C-cost-rises-by-nearly-15>.

⁶³ B. van Zuijlen, W. Zappa, W. Turkenburg, G. van der Schrier, M. van den Broek, 'Cost-optimal reliable power generation in a deep decarbonization future', *Applied Energy*, 253 (2019) 113587.

ook beschreven in twee factsheets die oktober 2019 door de KNAW naar de Tweede Kamer zijn gestuurd.^{64,65}

Bij de berekeningen van de UU is gebruik gemaakt van gegevens zoals vermeld in tabel 3. In de berekeningen is daarnaast de koppeling van hoogspanningsnetten tussen de landen in Europa als variabele meegenomen.

Voor enkele technieken (kernenergie, zonne-energie, windenergie, en aardgascentrales met CCS) is daarnaast onderzocht hoe gevoelig de uitkomsten zijn voor de verandering van de veronderstelde waarden zoals tussen haakjes vermeld in de tabel. Voor aardgascentrales met CCS zouden de aangepaste waarden kunnen gelden als de ontwikkeling van de zogenaamde Allam Cycle succesvol verloopt.

Technologie	Investeringskosten (TCR) [€/kW]	Omzettingsrendement [%]	Economische levensduur [jaar]	Bouwtijd [jaar]
Gasturbine	600	44	30	1
Aardgascentrale	1000	62	30	3
Aardgascentrale + CCS	1600 (1200)	55 (59)	30	4 (3)
Kolenvergasser + CCS	3700	41	35	6
Kerncentrale	5300 (7900)	38	60 (40)	7 (10)
Windvermogen op land	1300 (1000)	-*	25	1
Windvermogen op zee	2600 (1500)	-	30	1
Zon-PV-vermogen op daken	600 (400)	-	25 (30)	1
Zon-PV-vermogen op land	500 (300)	-	25 (30)	1
Biomassacentrale	2500	38	25	3
Biomassacentrale + CCS (BECCS)	4100	30	25	4
Geothermie	3500	-	30	3
Elektrolyse (productie groene H ₂)	400	65½	10	1
Omzetting H ₂ in stroom	1000	62	30	3

Tabel 3: Technisch-economische gegevens zoals in de UU-studie gebruikt. Daarnaast is voor aardgas een kostprijs van 7,0 €/GJ verondersteld, voor uraan 1,0 €/GJ, voor kolen 2,1 €/GJ en voor houtige biomassa 6,9 €/GJ.

*Het omzettingsrendement van zon en wind is niet weergegeven omdat bij zon- en windenergie in tegenstelling tot nucleair, kolen en gas geen sprake is van omzetting van een ingekochte grondstof die ook anders ingezet zou kunnen worden.

In de studie is behalve naar het basisscenario – het scenario dat tot de laagste kostprijs leidt – ook gekeken naar scenario's waaraan aanvullend nog andere eisen worden gesteld. In het eerste alternatief was de eis dat tenminste 70% van de gebruikte stroom in West-Europa door zon-PV- of windvermogen wordt opgewekt.

In het tweede alternatief werd het toepassen van CCS in de elektriciteitsvoorziening niet toegestaan.

Het onderzoek laat zien dat in het basisscenario kerncentrales een grotere rol spelen. Ruwweg 1/3 van de gebruikte stroom in West-Europa is in 2050 uit kerncentrales afkomstig, 1/3 uit zon- en windvermogen en 1/3 uit andere opties (waterkrachtcentrales,

⁶⁴ Factsheet Prof. Dr W.C Turkenburg, 'Visies op de toekomst van kernenergie in de energietransitie', Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

⁶⁵ Factsheet Prof. Dr Ir J.L. Kloosterman, 'Kernenergie in een CO2-vrije energiemix', Parlement en Wetenschap, Den Haag, 23 oktober 2019.

aardgascentrales met en zonder CCS, geothermiecentrales, biomassacentrales met of zonder CCS en opslag elektriciteit in accu's).

Ook als in de berekeningen voor kernenergie een hogere kostprijs wordt verondersteld - zie tabel 3 - blijft met een bijdrage van 1/4 aan het elektriciteitsgebruik de rol van kerncentrales aanzienlijk.

Wanneer het gebruik van CCS in de elektriciteitsvoorziening niet wordt toegestaan en we toch nul-emissie van CO₂ willen realiseren, neemt in het model de bijdrage van kernenergie fors toe, naar ruim 40%. Als daarentegen 70% van de gebruikte stroom uit zon-PV en windvermogen moet komen, zakt de bijdrage van kernenergie naar 0% - andere opties om in de resterende 30% van de elektriciteitsvraag te voorzien en de betrouwbaarheid te garanderen zijn dan kosteneffectiever. Wel zijn in dit scenario de totale kosten van stroomopwekking zo'n 10% hoger dan in het basisscenario.

Het hierboven geschetste beeld verandert drastisch als voor de investeringskosten van zon-PV en windturbines de lage waarden uit de tabel worden aangenomen. In dit geval zakt ook in het basisscenario de bijdrage van kernenergie naar nul. Hetzelfde gebeurt als bij de inzet van aardgas, door toepassing van de Allam Cycle, de daarbij geproduceerde CO₂ tegen relatief lage kosten kan worden afgevangen en ondergronds opgeslagen.

De conclusie is dat de kosteneffectiviteit van nieuwbouw van kerncentrales sterk afhangt van enerzijds de prijsontwikkeling van zon- en windvermogen en ook het beleid dat gevoerd wordt om de toepassing van hernieuwbare energie te bevorderen en anderzijds de ontwikkeling van nieuwe typen aardgascentrales zonder CO₂ uitstoot. Wel kan dit beeld veranderen als de kosten van kernenergie aanmerkelijk kunnen worden gereduceerd.⁶⁶

Afsluitende opmerking

Tot slot nog het volgende: Ter uitwerking van het Nederlandse Klimaatakkoord wordt momenteel een Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 voor ons land uitgevoerd, onder leiding van een werkgroep genaamd 'Werkgroep Integraal Netwerk en Energiesysteem van de Toekomst' (INET). Het doel van deze verkenning is een breed gedragen langetermijnperspectief voor het energiesysteem en voor de energienetten van de toekomst te bieden. Dit beeld moet houvast geven voor het te voeren overheidsbeleid en voor investeringsbeslissingen. De verkenning zal zich onder meer op langetermijnsenario's voor een betrouwbare en betaalbare energiesysteem richten.⁶⁷

Naar aanleiding van recente publieke discussies over de mogelijke rol van kernenergie in de energiemix en ook een motie van de Tweede Kamer waarin aan de regering wordt gevraagd onderzoek te doen naar de mogelijke rol van kernenergie in de energievoorziening⁶⁸, is kernenergie in deze verkenning als variabele aan de langetermijnsenario's toegevoegd.

De resultaten van het onderzoek worden medio april 2020 verwacht en moeten meer inzicht geven in de mogelijke rol en toegevoegde waarde van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem.

⁶⁶ K.D. Tapia-Ahumada et al., 'Deep Decarbonization of the U.S. Electricity Sector: Is there a role for nuclear power?', MIT, Report 338, Sept. 2019.

⁶⁷ Netbeheer Nederland, 'Integrale infrastructuurverkenning 2030-2050 – scenario's voor toekomstbestendige energienetten', juli 2019.

⁶⁸ <https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/detail?id=2019Z13487&did=2019D27691>.

Bijlage

Motie 903 “Over het onderzoeken van de bestaande mogelijkheden en het volgen van de innovaties ten aanzien van kernenergie”:

Wij roepen het college op:

1. te onderzoeken welke rol kernenergie kan spelen in het provinciale energiebeleid en de Provinciale Staten hierover te informeren,
2. de innovatieve ontwikkelingen op het gebied van een nieuwe generatiekernreactoren nauwgezet te volgen en de Provinciale Staten hier bij nieuwe ontwikkelingen over te informeren.

Behandelvorschlag:

Het onderzoek dat wij voor u gaan uitvoeren zal de volgende elementen omvatten:

1. Overzicht van de huidige situatie in Nederland
 - a. Kernenergiewet (Rijksbevoegdheid, provincie is geen bevoegd gezag)
 - b. Maasvlakte als aangewezen zoeklocaties in Nederland
 - c. Voorwaarden om een aanvraag in te dienen op een aangewezen locatie
 - d. Procedure om te komen tot nieuwe locaties
 - e. Mogelijke rol voor PZH
2. Ontwikkeling
 - f. Technisch: huidige stand- en ontwikkeling van nieuwe technieken.
 - g. Economisch: haalbaarheid, schaalbaarheid en betaalbaarheid.
 - h. Maatschappelijke ontwikkelingen.
 - i. Internationale ontwikkelingen.
3. Mogelijke rol van kernenergie in de toekomstige energiemix en effecten op keuzes die nu gemaakt worden.