

**Onderwerp****Motie Kernenergie-Thorium****Kern mededeling:**

- Het huidige beleid in Flevoland is: geen kernenergie, vanwege het afvalprobleem.
- Provincie Flevoland heeft samen met de provincies Zuid-Holland en Overijssel, waar moties van gelijke strekking zijn aangenomen, onderzoek naar Kernenergie inclusief Thorium uitgevoerd.
- Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat heeft aangekondigd met een landelijk onderzoek te komen; de beslissing over het toepassen van kernenergie inclusief het bepalen van potentiële locaties is aan het rijk.
- De provincie Flevoland neemt nu geen ander standpunt in dan zoals verwoord in het Omgevingsprogramma.

Mededeling:

Tijdens de bespreking van de begroting, nog voor het instemmen met de ondertekening van het Klimaatakkoord, hebben Provinciale Staten aan Gedeputeerde Staten gevraagd om:

- bij het IPO en de minister aandacht te vragen voor onderzoek naar de mogelijke rol van kernenergie en thorium, waarbij gelet wordt op kosten, voorwaarden en beoogde bijdragen in het behalen van de klimaatdoelen;
- daarbij de mogelijkheden in beeld te brengen om dit onderzoek met andere provincies uit te voeren, aangezien een eventuele centrale niet noodzakelijk kerwijs in de provincie Flevoland hoeft te worden gebouwd;
- de onderzoeksresultaten te betrekken bij de totstandkoming van de RES 1.0.

In het Flevolandse omgevingsprogramma staat het volgende:

(6.1.1.2 Kernenergie) De provincie verleent geen medewerking aan de vestiging van kerncentrales in Flevoland, omdat er geen afdoende oplossingen worden geboden met betrekking tot veiligheid en afval.

Provincie Flevoland heeft samen met de provincies Zuid-Holland en Overijssel, waar moties van gelijke strekking zijn aangenomen, onderzoek naar Kernenergie inclusief Thorium uitgevoerd. De rapportage treft u aan als bijlage bij deze mededeling.

De rapportage dient tevens ter voorbereiding op de kennissessie over Thorium, die op 17 maart 2020 in Zwolle plaatsvindt. Deze bijeenkomst is door Provinciale Staten en Gedeputeerde Staten van Overijssel georganiseerd; Statenleden van alle provincies zijn uitgenodigd deel te nemen.

Nationaal is het aan de markt om initiatieven te nemen om nieuwe kerncentrales te bouwen. Marktpartijen die aan alle randvoorwaarden voldoen kunnen in aanmerking komen voor een vergunning voor de bouw van een kerncentrale (zie de 'randvoorwaardenbrief', Kamerstuk 32 645, nr. 1).

In het verleden zijn er locaties aangewezen waar mogelijk een nieuwe kerncentrale kan worden gevestigd. De markt kan daartoe initiatieven nemen. Voor 2030 wordt er in Nederland naar verwachting geen nieuwe kerncentrale operationeel.

Kernenergie is niet uitgesloten van het Klimaatakkoord. Als mogelijkheid om de 2030-doelen te halen is kernenergie niet in beeld, omdat nieuwbouw van een

Registratienummer**2571295****Datum****3 maart 2020****Afdeling/Bureau****SENB****Openbaarheid****Openbaar****Portefeuillehouder****Fackeldey, J.A.****Lijst ingekomen stukken****Provinciale Staten****25 maart 2020**



kerncentrale langer duurt dan periode waarvoor het Klimaatakkoord is opgesteld. Voor de periode tot 2050 kan kernenergie alsnog een rol gaan spelen.

Voor nieuwe concepten van kernenergie (zoals op basis van thorium als splijtstof in plaats van het gebruikelijke uranium) is nog veel onderzoek nodig. Thoriumreactoren zijn nog nergens commercieel gerealiseerd; volgens Nederlandse deskundigen kan dat nog wel enkele decennia duren. Het is dus praktisch onmogelijk om voor 2030 (richtjaar van het Klimaatakkoord) commerciële thoriumreactoren in bedrijf te hebben, en zelfs 2050 lijkt lastig haalbaar.

Het huidige beleid in Flevoland is: geen kernenergie, vanwege het afvalprobleem.

Nu wordt er geen ander standpunt ingenomen.

Als landelijke ontwikkelingen daartoe aanleiding geven worden Provinciale Staten daar over geïnformeerd.

Bijlagen

Naam bijlage:	eDocs nummer:	Openbaar in de zin van de WOB (ja/nee aangeven)
Onderzoek kernenergie en thorium	2567766	Ja
Factsheet 'Visies op de toekomst in de energietransitie'	2568368	Ja
Factsheet 'Kernenergie in een CO2 vrije energiemix'	2568367	ja
Factsheet 'Kernenergie in de praktijk'	2568366	Ja

Onderzoek kernenergie en thorium - n.a.v. motie #2513485

Inleiding

De Nederlandse overheid heeft zichzelf verschillende klimaatdoelstellingen gesteld om zo een bijdrage te leveren aan de mondiale klimaatopgave zoals beschreven in het klimaatverdrag van Parijs. Het streven is om in Nederland de uitstoot van broeikasgassen in 2030 met 49% te verminderen ten opzichte van 1990.

In het kader van de haalbaarheid van deze klimaatdoelstellingen is er hernieuwde aandacht voor kernenergie. Kernenergie kan een reductie van de broeikasuitstoot leveren en wordt daarom gezien als mogelijkheid om bij te dragen aan een duurzamere samenleving.

In de discussie rondom kernenergie zijn onderstaande argumenten (tabel 1) veelgehoord.

Wat pleit vóór kernenergie	Wat pleit tegen kernenergie
Geen CO ₂ uitstoot	Bouw van centrales duurt lang en is duur
Voldoende grondstoffen	Niet zo geschikt als aanvulling op zon en wind*
Weinig ruimtebeslag	Weinig ervaring in NL
Nieuwe kerncentrales steeds veiliger	Afval blijft 100.000 jaar gevaarlijk
	Risico op mogelijk misbruik door wapenindustrie

Tabel 1. Bron: ASN Bank 'Kernenergie, schoon of gevaarlijk?', gepubliceerd december 2019.

* Kernenergie is zeer geschikt als basis vanwege de stabiliteit. 'Niet zo geschikt als aanvulling op zon en wind' heeft betrekking op de snelheid waarmee een centrale kan bijschakelen; die van een kerncentrale is veel lager dan van een gascentrale.

Deze rapportage gaat hier nader op in aan de hand van gerenommeerde bronnen zoals de TU Delft en de Universiteit Utrecht.

1. Overzicht

Kernenergie in de wereld en in Nederland

Wereldwijd hebben 452 kernreactoren gezamenlijk een capaciteit van 399 GWe, waarmee zij in 2019 ca. 10% van de totale elektriciteit leverden¹. Binnen de EU wordt in veertien landen kernenergie geproduceerd, in 2019 goed voor circa 25% van de totale elektriciteitsproductie. Nederland heeft één kernreactor voor elektriciteitsproductie, in Borssele. Deze kerncentrale van 480 MWe levert ca. 3-4% van de nationale elektriciteitsvraag. De centrale werd in 1973 in gebruik genomen en wordt uiterlijk in 2033 gesloten. Op dit moment zijn er volgens de Rijksoverheid geen plannen voor een nieuwe centrale. Naast de kerncentrale in Borssele zijn er twee onderzoeksreactoren in Petten en Delft.

¹ Factsheet 'Kernenergie in de praktijk' door Prof. Dr. B. van der Zwaan, 23 okt 2019

Nucleaire installaties in Nederland



Bron: ANVS <https://www.autoriteitnvs.nl/onderwerpen/nucleaire-installaties>

In de EU worden gedurende het komende decennium waarschijnlijk meer kerncentrales gesloten dan dat er nieuwe gebouwd worden, zodat het relatieve aandeel van kernenergie in de totale elektriciteitsproductie vermoedelijk zal afnemen.

Juridische context

Er bestaan wettelijke kaders voor nucleaire veiligheid en stralingsbescherming in Nederland. De belangrijkste is de Kernenergiewet. Deze trad in werking in 1970 in de tijd dat er veel aandacht was voor het veiligheidsaspect rondom ioniserende straling, maar ook voor de bevordering van kernenergie.

Op basis van deze wet kunnen vergunningen worden verleend aan organisaties die zich bezighouden met kernenergie. Het bevoegd gezag onder de Kernenergiewet is de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS). Zij dient voldoende afstand van de politiek te houden, geen onderdeel te zijn van grotere organisaties en te beschikken over een exclusief eigen budget. De ministers van Financiën en Economische Zaken zijn toezichthouder en verantwoordelijk voor het beleid van de ANVS².

De Kernenergiewet kent twee belangrijke doelstellingen: (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; en (ii) bescherming tegen de aan verwezenlijking van de eerste doelstelling verbonden gevaren.

In de bestaande juridische context hebben de provincies geen rol. Zij worden wel vanuit extern veiligheidsoogpunt geïnformeerd wanneer er een initiatiefnemer is op een van de aangewezen zoeklocaties. In Nederland zijn drie locaties aangewezen: de tweede Maasvlakte, Borssele en de Eemshaven.

² Mr. dr. C.N.J. Kortmann & mr. drs. A. Span 'De Kernenergiewet in vogelvlucht', 2019

Wat is kernenergie?

De aarde bestaat uit heel veel verschillende stoffen. Die stoffen zijn samengesteld uit bouwstenen: atomen. Atomen vormen in onderling verband de bouwstenen van de stoffen op aarde: moleculen. Sommige atoomkernen zijn instabiel, ze willen uit elkaar vallen. Als dat gebeurt wordt met veel energie een klein deeltje uitgezonden.

Kernenergie is de energie die vrijkomt bij splijting van zware instabiele atoomkernen, zoals uranium-235. Dit proces heet kernsplijting. De warmte die vrijkomt bij kernsplijting wordt in een kerncentrale via stoom en een generator omgezet in elektriciteit. De mens heeft kernsplijting en straling leren gebruiken voor talloze nuttige toepassingen, denk aan de warmteproductie voor de stoomcyclus van een kerncentrale waarmee elektriciteit wordt opgewekt. Maar denk ook aan röntgenstraling voor medische diagnostiek.

Radioactieve straling en normering

Bij kernsplijting vervallen instabiele atoomkernen spontaan naar stabiele atoomkernen. Daarbij zenden ze ioniserende straling uit, wat ook wel radioactieve straling wordt genoemd. Blootstelling aan teveel ioniserende ('radioactieve') straling kan de gezondheid schaden. Er worden daarom strenge normen gehanteerd. De eenheid om een stralingsdosis te meten is de Sievert (Sv).

De wettelijke dosislimiet die je door kunstmatige bronnen mag oplopen is 1 milliSievert (mSv) per jaar.³ Deze dosis komt boven op de jaarlijkse dosis van ongeveer 2,5 mSv door natuurlijke achtergrondstraling, waaraan je lichaam voortdurend wordt blootgesteld. Jaarlijks lopen we in Nederland ongeveer 2,5 milliSievert achtergrondstraling op, deze dosis is niet schadelijk is voor je gezondheid. Een deel van de achtergrondstraling is afkomstig uit de aarde en is afhankelijk van de hoeveelheid kalium, radium, thorium en uranium in de plaatselijke grondsoort. Daarnaast is er kosmische straling. De achtergrondstraling is vooral van belang om de ernst van de extra bestraling door kunstmatige stralingsbronnen in perspectief te kunnen plaatsen.

In vergelijking met het buitenland is de stralingsbelasting in Nederland laag. In België ligt de totale stralingsbelasting bijvoorbeeld op 5,52 mSv en in de VS op 6.2 mSv⁴.

Hoeveelheid in mSv	Herkomst dosis/effect
0,00001	Een jaar in de buurt van de kerncentrale wonen
0,05	Tien uur vliegen van Amsterdam naar de USA
0,3	Kosmische straling in Nederland per jaar
0,34	Een jaar wonen in een betonnen appartement
0,4	De straling die jouw eigen lichaam afgeeft in een jaar
1	Gemiddelde dosis per jaar als gevolg van medisch handelen in Nederland, tevens de wettelijke limiet voor blootstelling aan kunstmatige bronnen
2,5	De gemiddelde jaarlijkse stralingsdosis die een Nederlander oploopt
6	Bedrijfslimiet EPZ voor jaardosis medewerkers kerncentrale
8	De dosis straling die een skileraar per jaar oploopt
20	Wettelijke dosislimiet per jaar voor radiologisch werkers
150 - 300	Schade aan DNA
300 - 700	Misselijkheid en hoofdpijn
4000 - 7000	Dodelijk

Bron: EPZ, Soorten Straling: <https://epz.nl/themas/milieu-gezondheid/soorten-straling>

³ <https://wetten.overheid.nl/BWBR0012702/2017-08-01#Hoofdstuk2>

⁴ <https://www.rivm.nl/stralingsbelasting-in-nederland/aandeel-per-stralingsbron>

Halveringstijd

Een kenmerk van radioactiviteit is dat het minder wordt naarmate de tijd verstrijkt. Dat regelt de natuur zelf. Bij elk verval verandert een onstabiele atoomkern immers in een stabiele. Hoe meer tijd er verstrijkt, hoe minder radioactief iets wordt waardoor het minder straalt. Dat komt door het radioactief verval. In een bepaalde tijd halveert de activiteit van elke radioactieve stof. Hoe lang dat duurt, drukken we uit met halveringstijd. Dat is de tijd die nodig is om telkens de helft van de radioactiviteit kwijt te raken.

Na twee halveringstijden is de radioactiviteit de helft van de helft. Dat is dus een kwart van de beginwaarde. Iedere radioactieve stof heeft een eigen vaste halveringstijd. Voor de ene stof zijn dat secondes, voor andere stoffen (zoals plutonium) zijn dat duizenden jaren. Soms moet radioactief materiaal vele duizenden jaren opgeslagen worden voor het ophoudt met stralen.

2. Verdieping

Huidige kernreactoren

De eerste generatie kernreactoren werd tot ongeveer 1965 gebouwd. Reactoren zoals Borssele horen bij de tweede generatie. Deze reactoren zijn inmiddels bijna aan het einde van hun levensduur.

De kernreactoren die nu gebouwd worden zijn vaak van generatie-III of III+. Dit is een nieuw type kernreactor dat als veiliger beschouwd wordt dan zijn voorgangers. Voor bestaande reactoren is de kans op een kernongeval typisch éénmaal per 200.000 jaar, terwijl dit voor nieuwe een factor 10 kleiner is. Tussen reactortypen bestaan echter grote verschillen.

In de EU zijn op dit moment vier kernreactoren in aanbouw: één in Finland (Olkiluoto, sinds 2005), één in Frankrijk (Flamanville, sinds 2007) en twee in het Verenigd Koninkrijk (Hinkley Point, sinds 2018). Deze vier kernreactoren zijn zogenaamde EPRs (European Pressurised Water Reactors) van elk ca. 1650 MWe. Aan de bouwtijd (recentelijk soms oplopend tot 10-15 jaar) kunnen enkele jaren voorafgaan voor het verkrijgen van vergunningen.⁵

Door de extra veiligheidsmaatregelen geldt een langere bouwtijd en hoge investeringskosten voor de generatie-III/+ reactoren. Om op kortere termijn een bijdrage aan de energietransitie te kunnen leveren moet worden ingezet op generatie-III+-reactoren. Denkbaar is dat binnen 5-10 jaar reactoren van het type III+ op de westerse markt komen.⁶

Uranium

In huidige kerncentrales wordt uranium als brandstof gebruikt voor het produceren van kernenergie. Dit element heeft de hoogste atoommassa dat van nature op aarde voorkomt. 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 niet, of niet gemakkelijk gewonnen kunnen worden. Alleen op een aantal plaatsen komt uranium in voldoende hoge concentratie voor om door middel van mijnbouw gewonnen te kunnen worden. Na mijnbouw wordt het uranium gewonnen uit het erts via extractieprocessen. Canada, Australië en Kazachstan herbergen gezamenlijk meer dan de helft van de wereldvoorraden uranium.⁷

⁵ Factsheet 'Kernenergie in de praktijk' door Prof. Dr. B. van der Zwaan, 23 okt 2019

⁶ Presentatie Wim C. Turkenburg 'Een nieuwe generatie kerncentrales: komen ze eraan?', 2018

⁷ Clingendael International Energy Programme 'Uraniumwinning: Voorzieningszekerheid, milieu- en gezondheidseffecten en relevantie voor Nederland', oktober 2006

Voor het produceren van kernenergie is verrijkt uranium nodig. Het verrijken van uranium gebeurt onder andere met behulp van gascentrifuges. Voor het verrijken van uranium en het bouwen van kerncentrales is expertise, capaciteit en technologie nodig die slechts in een beperkt aantal landen beschikbaar zijn. Nederland beschikt slechts over een deel hiervan.⁸

De beschikbaarheid van uranium wordt ingeschat op minimaal honderd jaar op basis van de huidige jaarlijkse consumptie. De verwachting is dat bij toenemende vraag veel meer uranium gevonden zal worden. Op de lange termijn kan uranium uit zeewater worden gewonnen of kan de niet-splijtbare isotoop U-238 of thorium worden gebruikt als kweekstof.⁹ Schattingen van de hoeveelheid uranium die in de toekomst tegen een gegeven prijs gewonnen kan worden zijn uiteraard onzeker en er zijn de laatste decennia weinig serieuze pogingen geweest om de werelduranium-voorraad globaal te bepalen (boven de reeds bekende winbare voorraden). Al vele jaren is er weinig geïnvesteerd in uraniumexploratie omdat de lage prijs en de beschikbaarheid van grote bekende voorraden deden verwachten dat het vinden van nieuwe voorkomens weinig geld zou opleveren.¹⁰

Nieuwe kernreactoren

Inmiddels wordt gewerkt aan het ontwerp van de vierde generatie kernreactoren. Het ontwerpen, bewijzen van de technologie en veilig in productie brengen van deze nieuwe kernreactoren kost veel tijd. Zelfs met sterke verhoging van de onderzoeksbudgetten kunnen vierdegeneratie-reactoren pas rond 2050 grootschalig worden ingezet.¹¹

Twee voorbeelden van de vierde generatie kernreactoren:

a) Fast Breeder Reactor:

Sinds 2006 wordt onderzoek gedaan naar zogenoemde “fast breeders” waarbij neutronen op volle snelheid worden gebruikt om thorium te activeren. Dit concept dateert al uit de jaren 60, maar doordat er voldoende uranium beschikbaar bleek is het lange tijd niet doorontwikkeld. Een potentieel voordeel van deze snelle neutronensystemen is de mogelijkheid om transuranische elementen in verbruikte splijtstof te verbranden. Deze isotopen hebben namelijk een zeer lange halfwaardetijd en blijven daarom lange tijd een gezondheidsrisico. De belangrijkste FBR-ontwikkelingen in de afgelopen jaren vonden plaats in India (PFBR-500) en Rusland (BN-800-reactor).¹²

b) Molten Salt Reactor (MSR)

In dit reactortype is de brandstof (over het algemeen thorium) opgelost in gesmolten zout. Volgens de theorie kan (bijna) 100% van de brandstof in een MSR worden gebruikt voor energieproductie. Dat is aanzienlijk meer dan in de huidige generatie reactoren. Daarnaast produceert een MSR in theorie weinig langlevend radioactief afval (met een levensduur van zo'n 240 000 jaar). De radioactiviteit van het merendeel van het afval gevormd in de thoriumcyclus is binnen 300 jaar verminderd tot een zeer laag niveau. Deze reactoren hebben een aantal uitdagingen, met name de hoge corrosiviteit door de combinatie van zuurstof en waterdampen met het gesmolten zout. In Petten wordt onderzoek gedaan naar de reactiviteit van gesmolten zout. Deze onderzoeken vinden plaats zonder nucleair materiaal, maar leveren waardevolle informatie voor bijvoorbeeld de twee Chinese MSR reactoren in aanbouw. De gesmoltenzoutreactor ('thoriumreactor') zou aan duurzaamheidseisen kunnen voldoen maar komt niet binnen 30 jaar met de benodigde vergunningen op de markt.¹³

Thorium

Thorium is een metaal dat in aanvulling op uranium kan worden ingezet voor de opwek van energie. Thorium komt voor in de meeste zand en steensoorten. Het kan gebruikt worden in:

⁸ Factsheet 'Kernenergie in de praktijk' door Prof. Dr. B. van der Zwaan, 23 okt 2019

⁹ Factsheet 'Kernenergie in een CO₂-vrije energiemix' door Prof. dr. ir. Jan Leen Kloosterman, 23 okt 2019

¹⁰ De Groene Rekenkamer 'Uranium Plenty', 17 mei 2007

¹¹ Factsheet 'Kernenergie in een CO₂-vrije energiemix' door Prof. dr. ir. Jan Leen Kloosterman, 23 okt 2019

¹² Presentatie Wim C. Turkenburg 'Een nieuwe generatie kerncentrales: komen ze eraan?', 2018

¹³ Presentatie Wim C. Turkenburg 'Een nieuwe generatie kerncentrales: komen ze eraan?', 2018

1. Bestaande kernreactoren (met uranium als splijtstof toegevoegd aan thorium)
2. Een gesmolten zout reactor (Molten Salt Reactor, MSR). Dit is de verzamelnaam van alle typen reactoren waarin de brandstof is opgelost in zout, chloor- of fluorzouten.
3. Fast Breeder reactoren, waarbij snelle neutronen worden ingezet op splijting op gang te brengen.

Hoewel het zelf niet splijtbaar is, kan het na absorptie van langzame neutronen het uraniumisotoop U-233 vormen, dat wel splijtbaar is.¹⁴ Thorium is geen brandstof op zich, maar hulpmiddel waardoor uit uranium effectiever energie gehaald kan worden, met minder afval. Thorium maakt dus vollediger verbranding van uranium mogelijk. Om de omzetting van thorium in splijtbaar uranium in gang te zetten is dus uranium nodig. Thorium is een kweekmateriaal en is niet de splijtstof zelf: dat is uranium. Dus ook in een thoriumcentrale is dus nog steeds uranium nodig.

Op dit moment worden grote hoeveelheden Thorium naar boven gebracht bij het delven naar zeldzame aardmetalen en tin. De hoogste geschatte voorraden liggen in India, Brazilië, Australië, Egypte en Turkije. Het komt ook voor in Europese landen zoals Noorwegen, Zweden en Finland.¹⁵ Een toekomstige afhankelijkheid van deze landen is dus voorgeprogrammeerd bij inzet op thorium. Hoewel niet onuitputtelijk, lijkt de beschikbaarheid van thorium voorlopig geen probleem te vormen.

Afval

De hoeveelheid afval bij de productie van kernenergie is in omvang beperkt. De radioactiviteit en toxiciteit van kernafval zijn echter zeer schadelijk voor mens en milieu. Kernafval blijft radioactief gedurende duizenden jaren; sommige in kernreactoren geproduceerde isotopen blijven miljoenen jaren radioactief. Voor kernafval bestaan momenteel twee soorten opslag: bovengronds (in containers of bunkers zoals in Nederland en de Verenigde Staten) of in de diepe ondergrond (in geologische lagen, zoals in Finland, Frankrijk en Zweden).

Daarnaast produceren reactoren ook stoffen zwaarder dan uranium, zoals plutonium. Deze blijven radiotoxisch tot tweehonderdduizend jaar na productie. In vergelijking met uraniumcentrales produceert een MSR in theorie weinig langlevend radioactief afval (met een levensduur van zo'n 240.000 jaar). De vooronderstelling hierbij is dat alle langlevende radioactieve stoffen in de MSR blijven circuleren in het gesmolten zout totdat ze geheel verspleten zijn. Of het lukt om 100% van alle langlevende stoffen te versplijten is niet aangetoond. Wereldwijd bestaan er geen voorbeelden van.

Als 100% versplijten bij een thoriumcentrale niet lukt, blijft er radioactief afval over dat 240.000 jaar een risico oplevert. Hoewel er minder van het afval is, is het probleem van hoogactief kernafval is niet zozeer het volume, maar de toxiciteit en stralingsintensiteit. Er bestaat nog geen methode om dit afval veilig te bergen.

Nucleaire proliferatie

Het gebruik van kernenergie voor civiele doeleinden zoals energieproductie vergemakkelijkt het gebruik van nucleaire materialen of technologieën voor militaire doeleinden zoals kernwapenproductie. Het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA) in Wenen heeft als taak, naast het bevorderen van het veilig gebruik van kernenergie, het voorkómen van de proliferatie van nucleaire materialen of technologieën voor militaire doeleinden. Het gebruik van kernenergie kan ook het risico van terrorisme vergroten, zowel door potentiële agressie gericht op kerncentrales als door de mogelijkheid kernafval te gebruiken voor het fabriceren van zogenaamde 'vuile bommen'.¹⁶

¹⁴ Presentatie Wim C. Turkenburg 'Een nieuwe generatie kerncentrales: komen ze eraan?', 2018

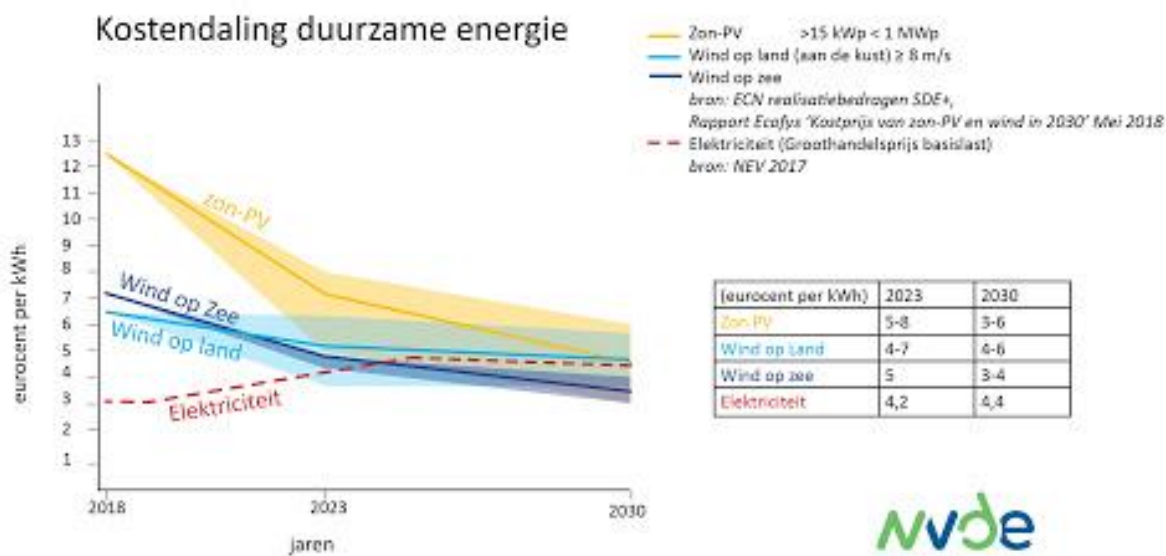
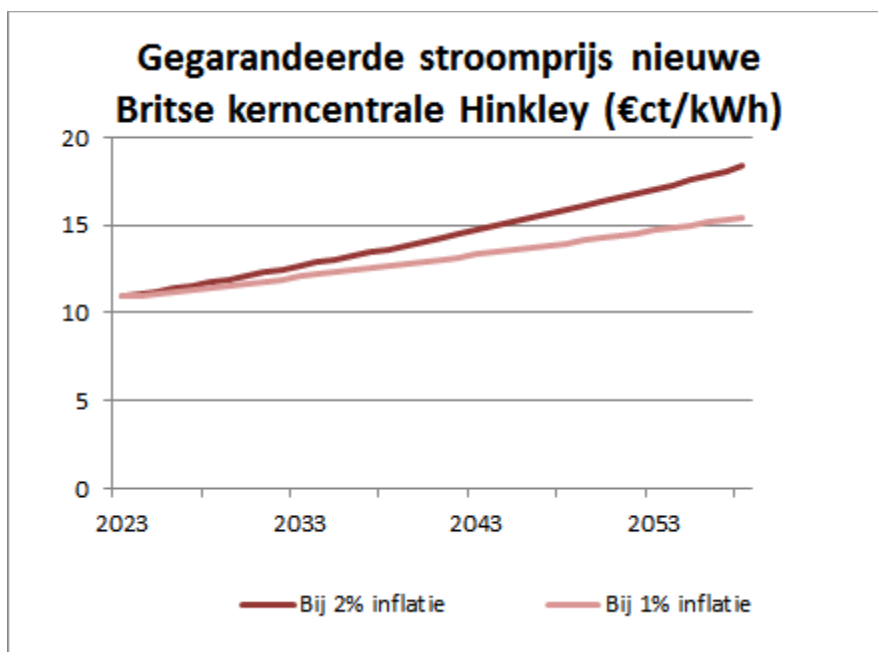
¹⁵ <https://www.thmsr.com/nl/in-detail-beschikbaarheid/>

¹⁶ Factsheet 'Kernenergie in de praktijk' door Prof. Dr. B. van der Zwaan, 23 okt 2019

3. Economische implicaties

Effectiviteit

Voor Hinkleypoint heeft de Britse overheid voor 35 jaar een garantieprijs van 11 cent per kWh afgegeven. Het laatst vergunde windpark in Nederland rekent met ongeveer 4.3 cent/kWh. Zon ligt tussen de 5 en de 8 cent/kWh.



Bron: NVDE <http://www.nvde.nl/nvdeblogs/kosten-stroom-wind-en-zon-gaan-richting-kolen-en-gas/>

Efficiëntie

De kosten van kernenergie per kWe zijn aanzienlijk hoger dan voor andere elektriciteitsproductieopties. In Nederland zou een kerncentrale van type EPR 23 (ca 1650 MWe) ongeveer 12 miljard euro kosten. Investeerders blijken slechts beperkt geïnteresseerd in de nieuwbouw van kerncentrales. Het verkrijgen van vergunningen, regelgeving, het bepalen van een geschikte locatie en publieke acceptatie spelen hierbij een rol. Maar ook de hoogte van de investeringskosten is een belangrijke factor. In Europa zijn de investeringskosten voor kernenergie de afgelopen jaren gestegen van € 1900-2700/kWe in 2007 tot € 3600-7200/kWe in 2018.¹⁷

Een probleem van de thoriumcyclus is dat deze cyclus nog vrijwel geheel opgebouwd moet worden, dus inclusief de infrastructuur die nodig is van grondstof-naar-reactor en ook van reactor-naar-afvalopslag. Dit vergt nieuwe kennis - ook bij de vergunningverlener - en grote investeringen, los van de ontwikkeling en bouw van de reactor zelf. De ontwikkeling van de reactor alleen vergt daarbij tenminste een paar miljard.¹⁸

Haalbaarheid en schaalbaarheid

Hoeveel kernenergie kost verschilt per type kernreactor en per land. Ook zijn de kosten afhankelijk van onder andere de schaalgrootte en de rol van de overheid. Meer publiek-private samenwerking zou de interesse van investeerders mogelijk vergroten en de financiering kunnen vergemakkelijken.

Toekomstperspectief

Omdat de relatieve bijdrage van kernenergie aan de wereldwijde elektriciteitsproductie gedurende dit decennium sterk is gedaald - van ca. 17% in 2010 tot ca. 10% in 2019 - en de komende decennia deze relatieve bijdrage mogelijk verder daalt, wordt door sommige energie-experts kernenergie een 20e-eeuwse technologie genoemd. De relatieve bijdrage van zon- en windenergie aan de wereldwijde elektriciteitsproductie is gedurende dit decennium juist sterk gestegen, en zal de komende decennia waarschijnlijk blijven stijgen.¹⁹ Ook zijn alternatieve opties sterk in kosten gedaald. Dat maakt hen tot concurrerende technologieën voor kernenergie.

4. Toekomst van kernenergie

Toekomstige energiemix

De TU Delft heeft uit scenariostudies geconcludeerd dat een energiesysteem mét kernenergie leidt tot een lagere kostprijs van elektriciteit dan een systeem zonder kernenergie. In een optimale energiemix zal ongeveer een derde van alle elektriciteit worden opgewekt met kernenergie. Hiervoor zijn in Nederland drie kernreactoren nodig van het type EPR²⁰.

De Universiteit Utrecht heeft een haalbaarheidsonderzoek²¹ gedaan naar de bouw van een kleinschalige kerncentrale in de provincie Utrecht. Er is uitgegaan van een centrale met het vermogen van 440 MWe (een EPR is ca. 1600 MWe), waardoor de kostprijs rond de 3 miljard euro zal zijn. Het is de vraag hoeveel tijd het vergt voordat zowel het ontwerp, als de bouw, als vervolgens de inbedrijfname van deze reactor door de onafhankelijke atoomwaakhonden wordt goedgekeurd. Vaak kost dit bij een nieuw ontwerp veel tijd. Ook kunnen er binnen deze procedures (aanvullende) eisen worden gesteld die tot aanpassing van het ontwerp en van de bouw moeten leiden, wat forse kostenverhogingen kan veroorzaken. Door deze onzekerheden, maar ook door de hoogte van de

¹⁷ Prijspeil 2018

¹⁸ Wim Turkenburg 'Is er toekomst voor de thoriumreactor?', Reactie aan Polmangroep, 21 feb 2020

¹⁹ Factsheet 'Kernenergie in de praktijk' door Prof. Dr. B. van der Zwaan, 23 okt 2019

²⁰ Factsheet 'Kernenergie in een CO₂-vrije energiemix' door Prof. dr. ir. Jan Leen Kloosterman, 23 okt 2019

²¹ Wim Turkenburg 'Wat zijn de kansen van een mini kerncentrale in Utrecht?', Universiteit Utrecht, 12 feb 2020

investeringen die gedaan moeten worden, zal het niet makkelijk zijn om in Nederland bedrijven te vinden die de bouw van een dergelijke reactor ter hand willen nemen - tenzij de overheid financieel fors bijspringt.

Daarbij komt voor investeerders ook nog een ander probleem: zij moeten al bij de inbedrijfname van de kerncentrale kunnen beschikken over voldoende middelen om de centrale ook weer af te kunnen breken. De afbraakkosten kunnen oplopen tot 30% van de investeringskosten.

Omdat de ontwikkeling van nieuwe vormen van kernenergie en de bouw van kernenergiecentrales erg langzaam gaat, kan kernenergie niet ingezet worden om het doel van 2030 (49% minder CO₂-uitstoot) te halen. In de berekeningen voor verschillende opties voor 2030 concludeert het Planbureau voor de Leefomgeving dat de bouw van een nieuwe kerncentrale (zoals bij centrales in aanbouw in Hinkley Point in Groot Brittanië en Flamanville in Frankrijk) meer dan tien jaar in beslag neemt. Dat maakt het, aldus PBL, twijfelachtig of kernenergie voor 2030 een bijdrage kan leveren aan emissiereductie van CO₂.²²

Bijlagen:

- Factsheet 'Visies op de toekomst in de energietransitie' - Wim Turkenburg
- Factsheet 'Kernenergie in een CO₂ vrije energiemix' - Jan Leen Kloosterman
- Factsheet 'Kernenergie in de praktijk' - Bob van der Zwaan

²² <https://www.klimaatakkoord.nl/elektriciteit/vraag-en-antwoord/wat-zijn-de-mogelijkheden-voor-kernenergie-als-optie-in-de-energietransitie>



Parlement en Wetenschap

VISIES OP DE TOEKOMST VAN KERNENERGIE IN DE ENERGIETRANSITIE

Deze factsheet is tot stand gekomen in het kader van de samenwerking tussen de Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.

23 oktober 2019

Prof. Dr Wim C. Turkenburg, Universiteit Utrecht

Klimaatverandering

Door menselijk handelen neemt de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer jaarlijks verontrustend toe. Dit leidt tot een steeds verdere toename van het broeikaseffect op aarde¹ met als gevolg klimaatverandering. Een indicator voor deze verandering is de gemiddelde temperatuur op het aardoppervlak. Uit metingen blijkt dat deze temperatuur sinds de industrialisatie met ongeveer 1 °C is gestegen. Geschat wordt dat het huidige klimaatbeleid van alle landen tezamen ertoe leidt dat de gemiddelde temperatuur op aarde met meer dan 3 °C zal stijgen².

Tijdens de Klimaatconferentie van Parijs³ is op 12 december 2015 overeengekomen dat de partijen bij het VN-klimaatverdrag (bijna alle landen) de stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde als gevolg van menselijk handelen ruim beneden 2 °C zullen houden en dat ze moeite zullen doen de stijging tot 1,5 °C te beperken. Realisatie hiervan vergt dat de uitstoot van broeikasgassen sterk wordt teruggedrongen. In de tweede helft van deze eeuw moet dit leiden tot een balans tussen de uitstoot en de vastlegging van broeikasgassen op aarde.

Een van de belangrijkste broeikasgassen is CO₂. De concentratie van CO₂ in de atmosfeer is toegenomen van 270 ppm⁴ vóór het industriële tijdperk naar zo'n 410 ppm nu. Jaarlijks komt daar circa 2½ ppm bij. Voor een overgroot deel is dit CO₂ die vrijkomt bij het gebruik van fossiele brandstoffen. Gelet op het klimaatakkoord van Parijs moet deze uitstoot jaarlijks worden teruggedrongen en rond 2050 vrijwel nul zijn. Vele technieken kunnen hierbij helpen, waaronder toepassing van kernenergie.

Gebruik kernsplijting in de energievoorziening

In de energievoorziening wordt kernsplijting momenteel vrijwel uitsluitend gebruikt voor het opwekken van elektriciteit. De bijdrage bereikte in 1996 een piekwaarde, te weten 17,5% van het mondiale elektriciteitsgebruik. In de jaren daarna nam dit percentage geleidelijk weer af, tot ongeveer 10% nu (ca. 2500 TWh⁵/jaar). Daarmee dekt kernenergie thans ongeveer 4½ % (ca. 27 EJ⁶/jaar) van de totale primaire energievraag wereldwijd. In Europa draagt kernenergie ongeveer 26% (ca. 800 TWh/jaar) bij aan de elektriciteitsvoorziening en in West-Europa is dit 29%. De kerncentrale Borssele produceert daarbij iets meer dan 3% (ca. 4 TWh/jaar) van de stroom die in Nederland jaarlijks wordt gebruikt.

In vele studies is onderzocht hoe technisch gezien de CO₂-uitstoot van het energiesysteem wereldwijd tot (vrijwel) nul, of zelfs tot negatieve waarden, kan worden teruggedrongen. Toegespitst op emissiepaden die leiden tot een gemiddelde temperatuurstijging op aarde van maximaal 1,5 °C, schetst het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hiervan een beeld in een *Special Report* met als titel '*Global Warming of 1.5°C*' dat in oktober 2018 door haar is vastgesteld. Geconstateerd wordt dat veel scenario's een toename in het gebruik van kernenergie projecteren terwijl andere scenario's

¹ Gedefinieerd als: een toename van de neerwaartse flux van infrarode straling op het aardoppervlak.

² UNEP, '*Emissions GAP Report 2018*', november 2018, ISBN: 978-92-807-3726-4.

³ 2015 Conference of Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (CoP21).

⁴ ppm: parts per million.

⁵ TWh: TeraWattuur, ofwel 10¹² Wattuur.

⁶ EJ: Exajoule, ofwel 10¹⁸ joule.

juist een afname laten zien⁷. De bevindingen worden als volgt samengevat: *“In de meeste 1,5-graden 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”*⁸.

Een uitspraak over de noodzaak of wenselijkheid van het gebruik van kernenergie in de energievoorziening doet het IPCC niet. Dat zou te politiek zijn. Wel presenteert het rapport in de samenvatting voor beleidsmakers ter illustratie vier energiepaden die alle tot 1,5 °C temperatuurstijging leiden. In deze vier paden wordt in absolute termen, en in wisselende gradaties, in 2050 méér gebruikgemaakt van kernenergie dan in 2017⁹.

Randvoorwaarden elektriciteitsvoorziening in 2050

Om de klimaatdoelstelling van Parijs te kunnen halen moet in Europa de uitstoot van CO₂ als gevolg van ons elektriciteitsgebruik vóór 2050 (vrijwel) nul of zelfs negatief zijn. Tegelijkertijd willen we dat de betrouwbaarheid van onze elektriciteitsvoorziening daar niet onder lijdt: het aantal uren per jaar dat het systeem geen stroom kan leveren moet op het huidige niveau blijven. Daarnaast dwingen economische principes tot een zo laag mogelijke kostprijs van stroom. Een vraag is dan hoe de elektriciteitsvoorziening er in 2050 uit zou kunnen zien, deze randvoorwaarden in aanmerking genomen. Van welke bronnen en technieken kunnen we - economisch gezien - het best gebruikmaken? En hoe sterk nemen de kosten toe als we bepaalde bronnen of technieken liever uitsluiten of juist willen stimuleren?

Kernenergie vs. andere opties

Door het Copernicus Instituut van de Universiteit Utrecht is de afgelopen jaren onder leiding van dr. Machteld van den Broek een rekenmodel ontwikkeld¹⁰ waarmee de vraag naar, en het aanbod van stroom in (regio's van) Europa van uur tot uur kan worden gesimuleerd. Ook kan met dit model 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, waaronder realisatie van (meer) zonnecelvermogen, windturbines, opslag van elektriciteit in de vorm van waterstof of in accu's; inzet van biomassa met of zonder CCS¹¹; inzet van aardgas met of zonder CCS; verdere uitbouw van hoogspanningsnetten in Europa, het direct uit de lucht halen van CO₂ (DAC¹²), et cetera.

Recent heeft de Utrechtse groep onderzocht welk elektriciteitssysteem in West-Europa, met enige toespitsing op Nederland, naar verwachting in 2050 het best aan de gestelde randvoorwaarden kan voldoen. De uitkomsten staan beschreven in een artikel dat vermoedelijk in de loop van 2019 door een wetenschappelijk tijdschrift zal worden gepubliceerd¹³. In deze notitie wordt hiervan een samenvatting gegeven.

Omdat de uitkomsten in hoge mate worden bepaald door de gegevens die in het model worden gestopt, geven we daarvan eerst een beeld – zie tabel. De gebruikte gegevens zijn voor een aanzienlijk deel gebaseerd op getallen die het Joint Research Centre (JRC¹⁴) gebruikt in studies voor de Europese Commissie. De waarden geven de verwachte investeringskosten in 2040, omdat het park dat in 2050 operationeel is al in 2040 grotendeels gerealiseerd zal zijn.

⁷ Bron: IPCC, Global Warming of 1.5°C, 'Special Report, 2018, ch. 4.3.1.3.

⁸ Bron: IPCC, 2018, ch. 2.4.2.1.

⁹ Zie: IPCC, 2018, Fig. 3b.

¹⁰ Op basis van extern verkrijgbare programmatuur, PLEXOS genaamd

¹¹ CCS: Carbon Capture and Storage ofwel CO₂-afvang en –opslag.

¹² DAC: Direct Air Capture

¹³ Bas van Zuijlen, William Zappa, Wim Turkenburg, Gerard van der Schrier, Machteld van den Broek, 'Cost-optimal reliable power generation in a deep decarbonization future', 2019 (submitted for publication).

¹⁴ De interne wetenschappelijke dienst van de Europese Commissie.

Tabel: Een aantal van de technisch economische gegevens zoals in de studie van de UU gebruikt *)

Technologie	Investerings-kosten (TCR) [€/kW]	Omzettings-rendement[%]	Economische levens-duur [jaar]	Bouwtijd [jaar]
Gasturbine	600	44	30	1
Aardgascentrale	1.000	62	30	3
Aardgascentrale + CCS	1.600 (1.200)	55 (59)	30	4 (3)
Kolenvergasser + CCS	3.700	41	35	6
Kerncentrale	5.300 (7.900)	38	60 (40)	7 (10)
Windvermogen op land	1.300 (1.000)	-	25	1
Windvermogen op zee	2.600 (1.500)	-	30	1
Zon-PV-vermogen op daken	600 (400)	-	25 (30)	1
Zon-PV-vermogen op land	500 (300)	-	25 (30)	1
Biomassacentrale	2.500	38	25	3
Biomassacentrale + CCS (BECCS)	4.100	30	25	4
Geothermiecentrale	3.500	-	30	3
Elektrolyse (productie groen H ₂)	400	65½	10	1
Omzetting H ₂ in stroom	1.000	62	30	3
Direct Air Capture (DAC)	42.500	-	20	1

*) Daarbij 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.

Voor enkele technieken (kerncentrales, zon-PV¹⁵, windturbines, en aardgascentrales met CCS) is bovendien nagegaan hoe gevoelig de uitkomsten zijn voor verandering van de veronderstelde waarden. De gewijzigde waarden staan tussen haakjes in de tabel. Wat betreft de aardgascentrale met CCS zouden de alternatieve getallen kunnen gelden, als de ontwikkeling van de zogenaamde Allam Cycle¹⁶ succesvol verloopt. Deze technologie zou een aardgascentrale met nul-emissie van CO₂ bij een verhoogd omzettingsrendement en verlaagde investeringskosten mogelijk moeten maken¹⁷.

In de studie is behalve naar het basisscenario – het scenario dat tot de laagste kostprijs leidt – ook gekeken naar andere scenario's, waarin aanvullende eisen worden gesteld aan de vormgeving van de elektriciteitsvoorziening of de te bereiken CO₂-emissiereductie. In het eerste alternatief werd geëist dat tenminste 70% van de gebruikte stroom in West-Europa door zon-PV- of windvermogen wordt opgewekt¹⁸. In het tweede alternatief werd toepassing van CCS in de elektriciteitsvoorziening niet toegestaan. In het derde alternatief werd de bijdrage van kernenergie in West-Europa exogeen beperkt tot maximaal 38 GW in Frankrijk, 6 GW in het Verenigd Koninkrijk, 3 GW in Scandinavië, 3 GW in Spanje en Portugal, en 1,5 GW in Italië, terwijl er in Duitsland, Nederland, België en Luxemburg geen kerncentrales staan. In het vierde alternatief, tenslotte, werd geëist dat in 2050 in het basisscenario de CO₂-uitstoot van het elektriciteitssysteem in West-Europa negatief zou zijn, te weten -1,1 gigaton¹⁹ per jaar.

¹⁵ Zon-PV: het omzetten van zonlicht in elektriciteit met behulp van het *photovoltaïsch effect*.

¹⁶ Allam Cycle: het proces van omzetting van fossiele brandstoffen in mechanische energie met behulp van zuivere zuurstof, waarbij het werkmedium voor de turbine CO₂ en water is en wordt afgevangen. De cyclus is genoemd naar zijn ontwikkelaar, Rodney John Allam.

¹⁷ Allam R. et al., *Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture*, Energy Procedia, 2017.

¹⁸ In dit scenario leveren zon-PV en windturbines in Nederland een bijdrage van 90 procent, door het grote potentieel aan wind-energie dat Nederland op zee heeft. Deels wordt de opgewekte stroom dan geëxporteerd.

¹⁹ Gigaton: 1 miljard ton; ca. $4,2 \times 10^{18}$ joule = 4,2 EJ.

Resultaten Utrechtse studie

Het onderzoek laat zien dat in het basisscenario kerncentrales een grote rol spelen. Bijna 30% van de gebruikte stroom is afkomstig van kerncentrales, tegenover 34% uit zon-PV en windturbines. Andere opties die worden benut zijn waterkrachtcentrales, aardgascentrales, geothermiecentrales en biomassa-centrales met CCS. Ook als voor kernenergie een hogere kostprijs wordt verondersteld - zie de tabel - blijft met 27% de bijdrage van kerncentrales aanzienlijk²⁰.

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 44%. 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 10% hoger dan in het basisscenario.

In het scenario waarbinnen het gebruik van kernenergie exogeen wordt beperkt produceren kerncentrales ongeveer 10% van de benodigde stroom. Het gat dat valt wordt dan gevuld door grotere inzet van zon-PV en wind, gascentrales, en biomassa-centrales met CCS.

Als in 2050 de uitstoot van CO₂ jaarlijks 1,1 gigaton negatief moet zijn, vindt CCS niet alleen bij biomassa-centrales plaats maar ook bij aardgascentrales. De bijdrage van kernenergie neemt daardoor iets af, van bijna 30% naar bijna 28%. Interessant is dat in dit scenario ook gebruik wordt gemaakt van *Direct Air Capture* om CO₂ uit de lucht te halen en ondergronds op te slaan.

Het geschetste beeld verandert overigens drastisch als voor zon-PV en wind de lage waarden uit de tabel voor de investeringskosten 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, alle geproduceerde CO₂ tegen relatief lage kosten kan worden afgevangen en ondergronds opgeslagen.

Opvallend is overigens dat in geen van de onderzochte scenario's het produceren van waterstof uit overschotten van zon-PV en wind, om daar op een later tijdstip weer stroom mee op te wekken, een substantiële rol speelt²¹. Van deze optie wordt heel beperkt gebruikgemaakt als 70% van de stroom uit zon-PV-systemen en windturbines komt of als het toepassen van CCS niet wordt toegestaan. Wel wordt in de scenario's op een betekenisvolle schaal stroom opgeslagen in accu's van elektrische voertuigen.

Twee slotopmerkingen

Tot slot: nader onderzocht zou kunnen worden aan welke randvoorwaarden kerncentrales moeten voldoen om ze economisch aantrekkelijk te maken bij hoge penetratiegraden en lage kostprijzen van zon-PV- en windvermogen. Aldus kan een beeld ontstaan van de randvoorwaarden waaraan de ontwikkeling van generatie-IV-reactoren vanuit economisch gezichtspunt moet voldoen.

²⁰ Dit lijkt strijdig met het feit dat in de UK de bouw van een nieuwe kerncentrale (Hinkley Point C, 3200 MW) fors wordt gesubsidieerd. Daarvoor zijn enkele verklaringen. Allereerst is de verwachting dat bij deze centrale de kostprijs (TCR) misschien wel 10.000 euro per kW gaat bedragen. Later te bouwen centrales zouden dan goedkoper moeten zijn. Daarnaast wordt in het PLEXOS rekenmodel van de UU een macro-economische analyse gevolgd, waarbij een kerncentrale in principe binnen 40 tot 60 jaar moet worden terugverdiend. Voor investeerders gelden echter bedrijfseconomische criteria, zoals een terugverdiendtijd van 10 of 15 jaar of nog korter. Ook zijn er, zo leert de ervaring, bij de bouw van kerncentrales forse risico's en onzekerheden. Subsidies kunnen dan helpen om investeerders over de streep te trekken.

²¹ De belangrijkste reden is dat er van overschot maar een beperkt aantal uren in het jaar sprake is. Een te bouwen *electrolyzer* maakt jaarlijks dus weinig draaiuren. Dit maakt de geproduceerde groene waterstof duur. Een andere reden is dat bij de omzetting van stroom in waterstof en weer van waterstof in stroom zo'n 60% van de elektriciteit verloren gaat. Via de waterstofroute heb je daarom 2½ keer meer vermogen uit zon-PV en windturbines nodig om elektriciteit te leveren. Ook dit maakt de optie duur. Andere opties blijken dan economisch aantrekkelijker. Overigens sluit deze bevinding niet uit dat buiten de elektriciteitssector – in met name de industrie of de transportsector – het produceren en gebruiken van groene waterstof wel economisch aantrekkelijk kan zijn. In de aangehaalde UU-studie is dat niet onderzocht.

Aanvullend moet worden opgemerkt dat kernreactoren in de energievoorziening ook een rol kunnen spelen buiten de elektriciteitssector, bijvoorbeeld bij het leveren van hogetemperatuurwarmte aan industrieën, het integraal produceren van waterstof in plaats van stroom, het ontzilten van zeewater, en het leveren van energie aan installaties waarmee CO₂ door middel van *Direct Air Capture (DAC)* uit de lucht kan worden gehaald. Voor de ontwikkeling van kleine of middelgrote generatie-IV-reactoren kan het interessant zijn deze markten te verkennen.

Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NWO, TNO en VSNU bemiddelen tussen parlementaire kennisvraag en wetenschappelijk kennisaanbod. De informatie in het kader van Parlement en Wetenschap is afkomstig van vooraanstaande wetenschappers, maar niet onderworpen aan peer review en niet door de wetenschapsorganisaties geverifieerd.



Tweede Kamer
DER STATEN-GENERAAL





Parlement en Wetenschap

KERNENERGIE IN EEN CO₂ -VRIJE ENERGIEMIX

Deze factsheet is tot stand gekomen in het kader van de samenwerking tussen de Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.

23 oktober 2019

Auteur: Prof. dr. ir. Jan Leen Kloosterman, hoogleraar reactorfysica, Technische Universiteit Delft

Hoofdvragen

Welke rol is er weggelegd is voor kernenergie in Nederland met het oog op het realiseren van een verregaande reductie van broeikasgassen? Hoe verhoudt het potentieel van kernenergie (op termijn) zich tot andere bronnen en past het in de toekomstige energievoorziening van Nederland?

Kerncentrales: technologie en ontwikkelingen

Wereldwijd is kernenergie na waterkracht de grootste producent van CO₂ -vrije elektriciteit. In 2017 verzorgden 445 kernreactoren¹ met een totaal geïnstalleerd vermogen van 396 GWe² ruim 10% van de mondiale elektriciteitsproductie³. Daarnaast zijn er 58 reactoren in aanbouw (met een geïnstalleerd vermogen van 63 GWe, ofwel 130 keer 'Borssele') en 110 reactoren gepland.

Soorten reactoren

De meeste reactoren zijn van de tweede generatie en behoren tot de klasse van lichtwaterreactoren (LWR), onderverdeeld in drukwaterreactoren (PWR) en kokendwaterreactoren (BWR)⁴. De kerncentrale Borssele is een PWR én een van de oudste nog in bedrijf zijnde reactoren. Zij behoort tot de beste 25% van haar soort en kan in bedrijf blijven tot 2034⁵. Dit toont aan dat oudere reactoren bij continue aandacht voor onderhoud en veiligheid kunnen wedijveren met nieuwe. Veel tweedegeneratiereactoren zijn ontworpen voor veertig jaar bedrijf, maar kunnen veelal zestig tot tachtig jaar in bedrijf blijven⁶. Dat is goedkoper dan nieuwbouw.

Veiligheid

Veiligheid van kernenergie is gebaseerd op het 'defence-in-depth'-principe waarbij de focus is gericht op:

- 1) preventie van ongevallen
- 2) beheersing van het ongevalsverloop
- 3) beperking van de gevolgen

Dit leidt tot een gelaagdheid in de verdediging, waarbij de verdedigingslijnen meervoudig en gescheiden zijn aangebracht en volgens verschillende principes werken. Naast een goed reactorontwerp zijn vooral onderhoud en een goede veiligheidscultuur van groot belang voor de reactorveiligheid.

De kernreactoren die nu in aanbouw zijn, zijn veelal van generatie-III of III+. In deze reactoren zijn de veiligheidsmechanismen die in tweedegeneratiereactoren pas in een later stadium zijn toegevoegd al opgenomen in het ontwerp. Bovendien zijn deze meer op passieve veiligheidsprincipes⁷ gebaseerd.

¹ Dit is inclusief enkele tientallen reactoren in Japan, hoewel die sinds de tsunami in 2011 nog niet in bedrijf zijn genomen.

² GWe staat voor Gigawatt elektrisch

³ Bron: World Nuclear Association (WNA), 2019

⁴ Respectievelijk Light-Water Reactor, Pressurized-Water Reactor en Boiling-Water Reactor

⁵ Bron: Kerncentrale Borssele, 2018

⁶ Bron: OECD, 2012 (in referentielijst 'OECDa')

⁷ Passieve veiligheidsprincipes: maatregelen gebaseerd op natuurwetten zonder noodzaak voor een externe energievoorziening of een extern regelsignaal

Denk hierbij aan:

- meervoudig uitgevoerde en grotere noodkoelwaterreservoirs en -injectiesystemen;
- meervoudige noodstroomvoorzieningen;
- gebunkerde ruimtes voor de splijtstofopslag en noodstroomvoorzieningen;
- een 'core catcher' om gesmolten splijtstof op te kunnen vangen;
- meervoudig uitgevoerde en zwaardere omhullingen om te voorkomen dat radioactieve stoffen kunnen vrijkomen of dat projectielen een kernongeval kunnen veroorzaken.

Voor bestaande reactoren is de kans op een kernongeval typisch éénmaal per 200.000 jaar, terwijl dit voor nieuwe een factor 10 kleiner is⁸. Tussen reactortypen bestaan echter grote verschillen.

Innovatie

Vrijwel alle lichtwaterreactoren werken met uranium waarin het aandeel van de splijtbare isotoop U-235 is verhoogd van 0,7% in natuurlijk uranium tot circa 5%. Bij het huidige verbruik zijn de bekende ('identified') uraniumvoorraden voldoende voor circa 130 jaar⁹. De verwachting is dat bij toenemende vraag veel meer uranium gevonden zal worden. Op de lange termijn kan uranium uit zeewater worden gewonnen of kan de niet-splijtbare isotoop U-238 of thorium worden gebruikt als kweekstof. Hiervoor zijn snelle kweekreactoren nodig die worden ontwikkeld in het kader van Generatie-IV International Forum (GIF¹⁰).

Behalve op het gebied van duurzaamheid excelleren vierdegeneratiereactoren ook op de gebieden veiligheid, economie en non-proliferatie. Door de lage prijs van uranium en de lange bedrijfstijd van reactoren uit de generatie-III/III+, zullen vierdegeneratiereactoren pas ver na 2050 nodig zijn¹¹. Kansrijke concepten zijn de natriumgekoelde reactor, de loodgekoelde reactor of de gesmolten-zoutreactor. De laatste is sterk in opkomst en kan als enige ook thorium gebruiken als kweekstof. Met de inzet van kweekreactoren kan kernenergie voor (vele) duizenden jaren in het mondiale elektriciteitsverbruik voorzien.

Moderne centrales zoals de European Pressurized-water Reactor (EPR) bestaan uit grote eenheden¹² die bedrijfseconomisch leunen op 'economy of scale'. Dergelijke reactoren kosten circa acht miljard euro, kunnen binnen acht jaar worden gebouwd en kunnen gedurende tachtig jaar elektriciteit produceren. De grote investeringen en lange bouwtijd vormen voor veel commerciële energiebedrijven een obstakel. Om die reden worden kleine reactoren ontwikkeld die snel, modulair en fabrieksmatig gebouwd kunnen worden en die bedrijfseconomisch leunen op 'economy of number'. Dit is de klasse van 'Small Modular Reactors' (SMR). Voorbeelden zijn de Hoge Temperatuur Gasgekoelde Reactor (HTGR) die binnenkort in China in bedrijf komt en diverse LWR-concepten die in de VS worden ontwikkeld. Ook het VK heeft een onderzoeksprogramma op het gebied van SMR's.

Kernafval

Kernreactoren produceren kernsplijttingsafval met een hoge radiotoxiciteit¹³ tot driehonderd jaar na productie. Daarnaast produceren reactoren ook stoffen zwaarder dan uranium, zoals plutonium. Deze blijven radiotoxisch tot tweehonderdduizend jaar na productie.

⁸ Bron: Goldberg, 2011

⁹ Bron: Nuclear Energy Agency (NEA), 2018

¹⁰ Zie website. In het GIF zijn twaalf landen vertegenwoordigd met belangstelling voor nieuwe typen reactoren, plus Euratom

¹¹ De verwachting is dat deze vierdegeneratiereactoren pas rond 2050 grootschalig kunnen worden ingezet, maar zelfs dan alleen als de onderzoeksbudgetten sterk worden verhoogd. Om op kortere termijn een bijdrage aan de energietransitie te kunnen leveren zou daarom moeten worden ingezet op generatie-III+-reactoren. Parallel kan dan worden gewerkt aan een nieuwe generatie (thorium)reactoren.

¹² De EPR heeft een elektrisch vermogen van 1650 MegaWatt; meer dan drie keer dat van Kerncentrale Borssele

¹³ Giftig door radioactiviteit – een maat voor de biologische schade die radioactieve stoffen bij inname of inhalatie kunnen veroorzaken

In sommige landen, zoals Nederland en Frankrijk, wordt de gebruikte splijtstof opgewerkt (gezuiverd) waarbij het uranium en plutonium worden afgescheiden van de rest. Die rest bestaat uit splijttingsproducten en ‘minor actinides’¹⁴ en wordt in verglaasde vorm¹⁵ gebracht voor opslag in de diepe ondergrond. In Nederland wordt het afval eerst opgeslagen bij COVRA¹⁶ voor een periode van minimaal honderd jaar. Per jaar produceert Kerncentrale Borssele slechts 1,5 m3 verglaasd afval. Het plutonium kan eenmaal worden gerecycled in LWR’s (zoals nu gebeurt in Kerncentrale Borssele) waarbij een deel van het plutonium wordt verspleten. De resterende fractie kan worden gerecycled in vierdegeneratie-reactoren of moet worden opgeslagen in de grond. Geologische opslag van kernafval is wetenschappelijk en technisch uitgebreid onderzocht. De hoeveelheid radiotoxiciteit die uiteindelijk terugkeert in de biosfeer is verwaarloosbaar klein ten opzichte van het natuurlijke stralingsniveau (tienden van procenten voor opslag in klei¹⁷, honderdsten tot duizendsten van procenten voor opslag in zout en graniet¹⁸).

Benodigde infrastructuur voor kernenergie

Kernreactoren produceren warmte die gedeeltelijk wordt omgezet in elektriciteit. Het rendement bedraagt 35-40%, wat betekent dat circa twee derde als restwarmte kan worden gebruikt of moet worden afgevoerd. De laatste optie vergt veel koelwater, de reden dat kerncentrales langs rivieren of aan de kust staan. Als onvoldoende koelwater voorhanden is kunnen koeltorens worden gebruikt om de restwarmte te lozen in de lucht. Verder moeten kerncentrales de geproduceerde elektriciteit kunnen voeden aan het elektriciteitsnet. Dit vereist een elektriciteitsnetwerk dat geschikt is voor grote vermogens. Nederland heeft meerdere locaties die aan deze eisen voldoen. Bovendien neemt kernenergie weinig ruimte in beslag en heeft Nederland een goede infrastructuur voor de behandeling en opslag van het kernafval.

Voor een optimaal gebruik van kernenergie moet worden voldaan aan een aantal randvoorwaarden. Een overzicht daarvan is in 2006 gepubliceerd door de International Atomic Energy Agency (IAEA). Het gaat dan om zaken als wetgeving, toezicht en het opleiden van personeel.

Kernsplijting en stralingstechnologie worden al in ruime mate ingezet in Nederland voor elektriciteitsproductie, medische isotopenproductie, wetenschappelijk onderzoek en andere toepassingen. Nederland heeft een goede infrastructuur die zonder veel investeringen nieuwe kerncentrales kan accommoderen.

Regelbaarheid van kerncentrales

Dat het vermogen van gas-, kolen- en kerncentrales regelbaar is, is cruciaal voor de stabilisatie van het elektriciteitsnet¹⁹. Het vermogen van deze centrales wordt continu aangepast om de frequentie van het net stabiel te houden op 50 Hertz. Deze frequentieregeling speelt op een tijdschaal van tien seconden (primaire frequentieregeling) en tien minuten (secundaire frequentieregeling). Frequentieregeling vergt van centrales een variatie van circa 7% van het vermogen. Daarnaast wordt het vermogen van de centrales continu aangepast aan de vraag naar elektriciteit. Dit zogenaamde lastvolgbedrijf (‘load-following’) speelt op een tijdschaal van een half uur.

¹⁴ *Actinides*: een reeks van vijftien elementen (89 t/m 103) uit het periodieke systeem. *Minor actinides*: de reeks minus uranium en plutonium. *Major actinides*: uranium en plutonium

¹⁵ Verglazen: in massief glas insluiten

¹⁶ Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval – zie website

¹⁷ Bron: Onderzoeksprogramma Eindberging Radioactief Afval (OPERA), 2018

¹⁸ Bron: Commissie Opbergen te Land (OPLA), 1989; Posiva Oy (Finse verwerker van kernafval), 2010

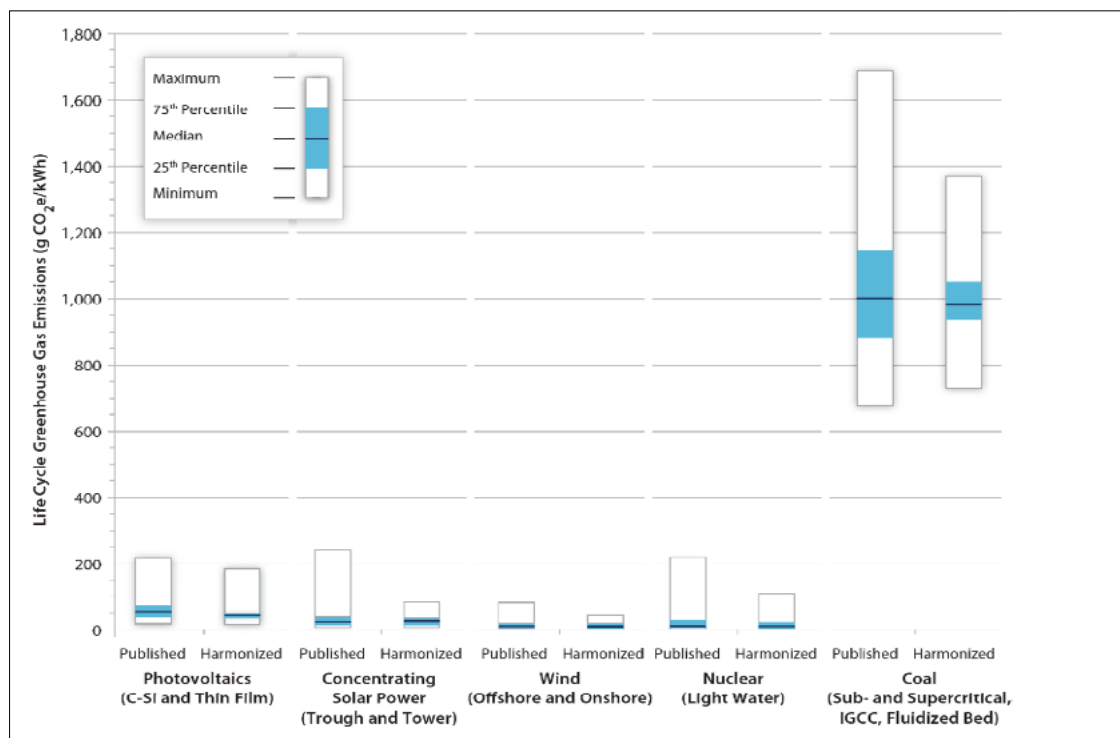
¹⁹ “Kerncentrales zijn regelbaar. Zo gaat de scenariostudie van de Universiteit Utrecht (UU) ervan uit dat een kerncentrale met een vermogen van 1500 MW teruggeregeld kan worden tot 300 MW en dat op- en afregeling mogelijk is met 75 MW per minuut. Als de centrale op deellast draait neemt het elektrisch rendement wel af. De rendementscurve die de Utrechtse studie gebruikt loopt van 38% bij 1500 MW en 36% bij ca. 950 MW naar 33% bij ca. 550 MW en 28% bij 300 MW. Uit de scenariostudie van de UU blijkt overigens dat de kerncentrales meestal in vollast draaien. De capaciteitsfactor die in 2050 gemiddeld wordt gehaald varieert tussen de scenario's van 79% tot 89%. Als deze factor belangrijk lager zou zijn worden andere opties om in de stroombehoefte te voorzien aantrekkelijker.” (e-mail W.C. Turkenburg, 20 mei 2019)

De 'European Utility Requirements'²⁰ eisen van moderne kerncentrales dat ze binnen vijftien minuten tussen de 50 en 100% van het nominaal vermogen kunnen regelen. Daarnaast moeten kerncentrales kunnen worden ingezet voor de primaire en secundaire frequentieregeling van het netwerk. De Franse kernreactoren worden al tientallen jaren ingezet voor frequentieregeling en lastvolgbedrijf en kunnen zonder problemen tweemaal per dag binnen een half uur schakelen van 20 naar 100% van het nominaal vermogen en terug. Dit is ruim voldoende om het dag-nachtritme in de elektriciteitsvraag te kunnen volgen. Wat regelbaarheid betreft presteren kerncentrales vergelijkbaar met kolencentrales, maar slechter dan bepaalde gascentrales²¹.

CO₂ -productie

De CO₂ -emissie bij de productie van elektriciteit door kerncentrales behoort tot de laagste van alle productiemethoden. Dit beeld verandert niet als de CO₂ -uitstoot tijdens de constructie en ontmanteling van kerncentrales en in de splijtstofcyclus wordt meegenomen. Figuur 1 geeft de geharmoniseerde uitkomst van 2.100 studies²². Hieruit blijkt dat kernenergie per eenheid elektriciteit tot een broeikasgasemissie leidt die vergelijkbaar is met die van zon-PV²³ en wind. Dit verklaart dat de CO₂ -uitstoot van Electricité de France in Frankrijk (waar 72% van de energie uit nucleaire bronnen en 18% uit hernieuwbare bronnen komt) een factor twintig lager ligt dan het gemiddelde wereldwijd: 25 versus 506 g/kWh²⁴.

Figuur 1: gepubliceerde en geharmoniseerde broeikasgasemissies van 2100 studies voor diverse productiemethoden (NREL, 2013).



De emissie van kernenergie ligt tussen die van zon-PV en wind.

²⁰ Nuclear Energy Institute (NEI), 2012

²¹ OECD, 2012 (in referentielijst: OECDb)

²² Bron: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013

²³ Zon-PV: het opvangen en omzetten van zonne-energie wordt zon-PV genoemd (PV van fotovoltaïc cell).

²⁴ Bron: atw – International Journal for Nuclear Power, 2019

Scenariostudies

De kostprijs van elektriciteit is hoger dan de productiekosten alleen. Een energiesysteem moet immers onder alle omstandigheden het gevraagde vermogen kunnen leveren. Met andere woorden: het energiesysteem moet adequaat zijn en een hoge leveringszekerheid bieden. De inzet van zon en wind kan tegen lage marginale kosten, maar hoge netwerkkosten vanwege de hoge variabiliteit van de bron, terwijl de inzet van regelbaar vermogen gepaard gaat met hoge marginale kosten en lage netwerkkosten. Voor kernenergie bedragen de specifieke netwerkkosten circa 2 euro/MWh, terwijl dit voor onshore wind, offshore wind en zon-PV respectievelijk 25, 35 en 45 euro/MWh bedraagt²⁵. Om de kostprijs van elektriciteit te bepalen moeten dus de kosten van het gehele energiesysteem worden berekend.

Een CO₂-vrije energievoorziening bestaat typisch uit een mix van:

- Variabele hernieuwbare energiesystemen²⁶ die niet regelbaar zijn, maar wel tegen lage marginale kosten kunnen produceren.
- Opslagsystemen voor energie, zoals waterkracht en batterijen voor dag-nachtvariaties en (wellicht) waterstof of synthetische brandstoffen voor seizoensgebonden variaties.
- Regelbaar vermogen zonder CO₂-uitstoot zoals bij gascentrales met opvang en opslag van CO₂ (CCS²⁷) of kerncentrales. Biomassacentrales met CCS zouden (in theorie) zelfs tot een netto negatieve CO₂-emissie kunnen leiden.

De transitie naar een CO₂-vrij energiesysteem is erop gebaseerd de elektriciteitsproductie zo snel mogelijk CO₂-vrij te maken en vervolgens zoveel mogelijk energieconsumptie te elektrificeren. Dat laatste betreft bijvoorbeeld verwarming, transport en industriële processen. Een metastudie van veertig gepubliceerde scenario's²⁸ laat zien dat scenariostudies uiteenvallen in twee groepen:

- A. Studies waarbij de elektriciteitsproductie volledig is gebaseerd op hernieuwbare energie, gecombineerd met seizoensopslag.
- B. Studies waarbij de inzet van hernieuwbare energie beperkt blijft en waarbij regelbare opties zoals gas- en biomassacentrales met CCS; kernenergie en geothermie worden ingezet.

Het blijkt dat voor groep A de kostprijs van het energiesysteem hoger is door de benodigde investeringen in:

1. Uitbreiding van het hernieuwbare vermogen tot wel drie keer de piekvraag bij een aandeel van 75%²⁹ en verder stijgend als dat aandeel toeneemt.
2. Sterke uitbreiding (verdubbeling of meer) van het internationale distributienetwerk.
3. De uitrol van 'smart grids' voor aanpassing van de elektriciteitsvraag aan de productie.
4. Conversie en opslag van elektriciteit/energie voor seizoensgebonden variaties.

Daarbij komt dat bovengenoemde technologieën niet uitwisselbaar zijn, wat betekent dat *alle* bovengenoemde opties technisch haalbaar en economisch aantrekkelijk moeten zijn, wil de energietransitie in een dergelijk scenario succesvol verlopen.

Voor de scenario's in groep B zijn naast uitbreiding van het hernieuwbaar vermogen ook additionele investeringen nodig in gas- en biomassacentrales met CCS, en in kerncentrales. Deze technologieën zijn wel onderling uitwisselbaar, waardoor de kans dat een CO₂-vrij energiesysteem succesvol kan worden gerealiseerd groter is. Vrijwel alle studies waarin wordt geoptimaliseerd naar minimale kosten en/of minimale risico's leiden tot scenario's in groep B³⁰.

²⁵ Bron: OECD, 2012 (in referentielijst: OECDb)

²⁶ Ofwel 'Renewable Energy Systems' (RES)

²⁷ 'Carbon capture and storage'.

²⁷ Nuclear Energy Institute (NEI), 2012

²⁸ BRON: JENKINS, 2018

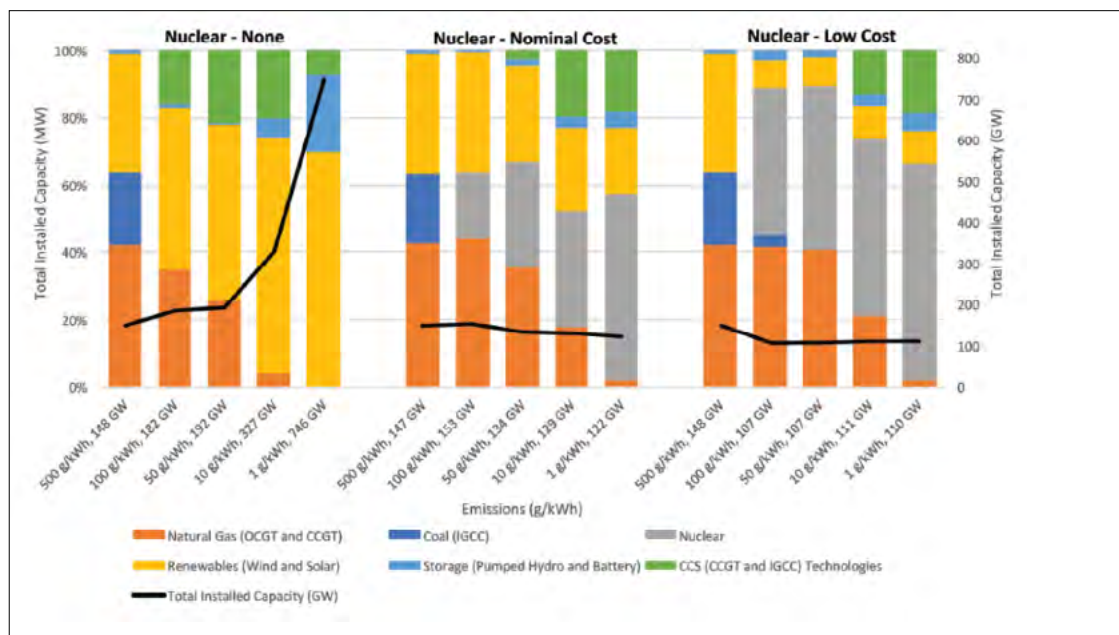
²⁹ BRON: OECD, 2019

³⁰ BRON: JENKINS, 2018

Een recente studie van het MIT Energy Initiative³¹ laat zien dat in een optimale energiemix het aandeel kernenergie sterk toeneemt als de toegestane CO₂ -emissie afneemt (de grijze balken in de middelste diagram van figuur 2). Het aandeel kernenergie is afhankelijk van de kostprijs en neemt toe bij lagere kosten (rechter diagram in figuur 2). Als kernenergie wordt uitgesloten (linker diagram) dan neemt het aandeel zon en wind sterk toe in combinatie met energieopslag of gas. In het extreme geval van een toegestane emissie van slechts 1 g/kWh CO₂ neemt het benodigde geïnstalleerde vermogen zonder kernenergie sterk toe met een factor zeven: van 122 GW tot 746 GW. Dat is nodig om de regionale variaties in zon en wind te kunnen opvangen. Dit verhoogt de kostprijs met ruim een factor twee. In het meer gematigde geval, 10 g/kWh CO₂, neemt het benodigde vermogen toe met een factor drie en stijgt de kostprijs met 15%. Bovengenoemde studie van het MIT laat dezelfde trends zien voor diverse landen in Europa en voor regio's in de VS en China.

De trends in bovenstaande resultaten worden bevestigd door studies van het Copernicus instituut van de Universiteit Utrecht. Scenariostudies voor Europa³² laten zien dat in een CO₂ -vrij systeem zonder kernenergie het geïnstalleerd vermogen verdubbelt. Als kernenergie wel wordt opgenomen heeft dit een aandeel van 1/6 in het geïnstalleerd vermogen en 1/3 in de elektriciteitsproductie, en leidt dit tot 25% lagere elektriciteitskosten (anders gezegd: kernenergie niet meenemen leidt tot een kostprijsverhoging van 35%). Voor Nederland zou dit aandeel van nucleaire energie overeenkomen met de elektriciteitsproductie van drie kernreactoren van het type EPR.

Een gevoeligheidsstudie³³ toont aan dat bij hogere investeringskosten (7900 in plaats van 5300 euro/kW), een langere constructietijd (tien in plaats van zeven jaar) en kortere bedrijfstijd (veertig in plaats van zestig jaar) het aandeel kernenergie in de elektriciteitsmix slechts in beperkte mate daalt. Het aandeel kernenergie neemt wel af als de kostprijs van hernieuwbare energie sterk daalt.



Figuur 2: optimale capaciteitsmix voor Frankrijk als functie van de toegestane CO₂ -emissie met de kostprijs van kernenergie als parameter (MIT, 2018).

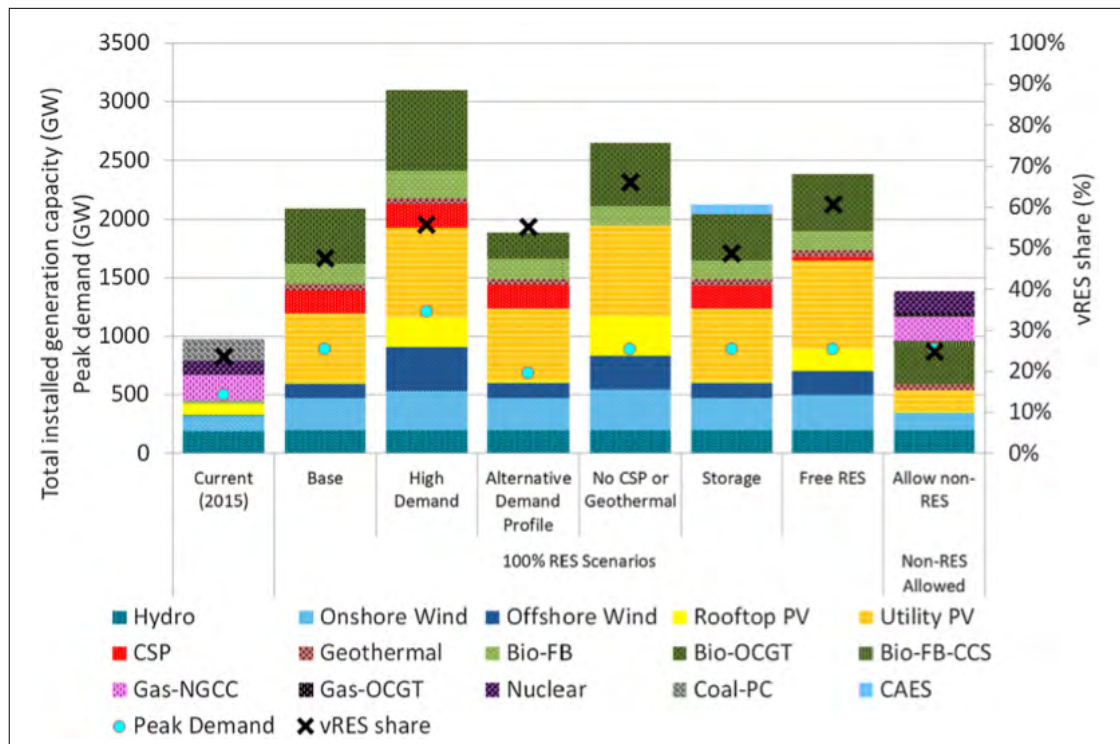
³¹ Bron: MIT, 2018

³² W. Zappa, 2019

³³ W.C. Turkenburg, 2019

Smart grids

Zoals uit scenariostudies blijkt is een groot aandeel aan regelbaar vermogen onmisbaar om te komen tot een stabiel netwerk met hoge leveringszekerheid. Met een slim netwerk zou de vraag naar elektriciteit kunnen worden aangepast aan de productie. Het is nog onduidelijk of dit een positief of negatief effect op de inzet van kernenergie zal hebben. Aan de ene kant zullen fluctuaties worden gedempt, wat kernenergie ten goede kan komen; anderzijds zullen kleine lokale netwerken kunnen ontstaan waar kernenergie niet in past (tenzij de ontwikkeling van SMR's doorzet).



Figuur 3: optimale capaciteitsmix voor Europa (Zappa, 2019). Alleen in het 'Allow non-RES'-scenario is kernenergie onderdeel van de mix. Vanwege de relatief lage marginale kosten in vergelijking met de andere regelbare opties produceert kernenergie met 1/6 van de capaciteit ongeveer 1/3 van de elektriciteit. De kosten zijn dan 25% lager dan in de goedkoopste van de andere CO₂-vrije scenario's (van "Base" tot "Free RES").

Conclusies en aanbevelingen

- Een energiesysteem, dat bestaat uit productie-eenheden en een distributienetwerk, moet adequaat zijn en een hoge leveringszekerheid bieden.
- Voor een adequaat en zeker CO₂-vrij energiesysteem is een fors aandeel van CO₂-vrij en regelbaar vermogen nodig, of een zeer grote overcapaciteit van hernieuwbare energie.
- Kernenergie is goed regelbaar en is goedkoper dan andere opties voor CO₂-vrij regelbaar vermogen, zoals gas met CCS of biomassa.
- Scenariostudies laten zien dat een energiesysteem mét kernenergie leidt tot een lagere kostprijs van elektriciteit dan een systeem zonder kernenergie.
- In een optimale energiemix zal ongeveer een derde van alle elektriciteit worden opgewekt met kernenergie. Hiervoor zijn in Nederland drie kernreactoren nodig van het type EPR.
- Bij de bouw van nieuwe kernreactoren is het essentieel dat overschrijding van constructietijd en -kosten, zoals in recente Europese projecten, wordt voorkomen. Standaardisatie in ontwerp, constructie, financiering en vergunningsverlening zijn daarvoor nodig.

Referenties

- Atw, 2019, Morilhat *et al*, Nuclear Power Plant Flexibility at EDF, atw 64(3).
- GIF, Generation-IV International Forum, <https://www.gen-4.org/gif/>
- Goldberg, 2011, Goldberg and Rosner, Nuclear reactors: From generation to generation, American Academy of Arts & Sciences.
- Jenkins, 2018, Jesse D. Jenkins *et al*, Getting to Zero Carbon Emissions in the Electric Power Sector, Joule **2**: 2487-2510.
- KCB, 2018, Borssele Benchmark Committee, Safety Benchmark of Borssele Nuclear Power Plant.
- MIT, 2018, MIT, The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World.
- NEA, 2018, NEA, Uranium 2018 Resources, Production and Demand.
- NEI, 2012, Lokhov, Load-following capabilities of Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering International, <https://www.neimagazine.com/features/featureload-following-capabilities-of-npps/>, geraadpleegd april 2019.
- NREL, 2013, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation, National Renewable Energy Laboratory.
- IAEA, 2006, Basic infrastructure for a nuclear power project, Tecdoc-1513, ISBN 92-0-108506-0.
- OECDa, 2012, OECD, The economics of long-term operation of nuclear power plants, ISBN 978-92-64-99205-4.
- OECDb, 2012, OECD, Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems, ISBN 978-92-64-18851-8.
- OECD, 2019, OECD, The costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables.
- OPERA, 2018, Verhoeven *et al*, Summary Opera safety case, www.covra.nl.
- OPLA, 1989, Commissie Opberging te Land (OPLA), Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland.
- OWID, 2016, Our World in Data, <https://ourworldindata.org/renewable-energy>, geconsulteerd april 2019.
- Posiva Oy, 2010, Hjerpe *et al*, Biosphere Assessment Report.
- W.C. Turkenburg, 2019; e-mailcorrespondentie 9 april 2019 en 20 mei 2019.
- WNA, 2019, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>, geconsulteerd april 2019.
- Zappa, 2019, Willam Zappa *et al*, Is a 100% renewable European power system feasible by 2050? Applied Energy **233-234**: 1027-1050.

Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NWO, TNO en VSNU bemiddelen tussen parlementaire kennisvraag en wetenschappelijk kennisaanbod. De informatie in het kader van Parlement en Wetenschap is afkomstig van vooraanstaande wetenschappers, maar niet onderworpen aan peer review en niet door de wetenschapsorganisaties geverifieerd.



Tweede Kamer
DER STATEN-GENERAAL





Parlement en Wetenschap

KERNENERGIE IN DE PRAKTIJK

Deze factsheet is tot stand gekomen in het kader van de samenwerking tussen de Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.

23 oktober 2019

Auteur: Prof. dr. Bob van der Zwaan, Universiteit van Amsterdam en TNO

Hoofdvraag

TNO is gevraagd om een toegepast-wetenschappelijke factsheet, waarin wordt ingegaan op praktische aspecten zoals de kosten van kernenergie en kernafval.

De rol van kernenergie

Wereldwijd hebben 452 kernreactoren gezamenlijk een capaciteit van 399 GWe¹, waarmee zij in 2019 ca. 10% van de totale elektriciteit leverden². Binnen de EU wordt in veertien landen kernenergie geproduceerd, in 2019 goed voor circa 25% van de totale elektriciteitsproductie. Nederland heeft één kernreactor voor elektriciteitsproductie, in Borssele. Deze kerncentrale van 480 MWe³ levert ca. 4% van de nationale elektriciteitsvraag. De centrale werd in 1973 in gebruik genomen en wordt uiterlijk in 2033 gesloten.

Klimaatverandering

Kerncentrales stoten geen CO₂ of andere broeikasgassen uit. Door middel van levenscyclusanalyse⁴ kan de intensiteit van broeikasgasemissies worden bepaald, inclusief de emissies gedurende de bouw van de centrale en de productie van brandstof (m.n. het verrijken van uranium). Dergelijke analyses wijzen uit dat kernenergie veel minder broeikasgassen uitstoot dan elektriciteitsproductie met gas en kolen: ca. 10 gCO₂eq/kWh (i.e. 10 gram CO₂-equivalent per kilowattuur) versus respectievelijk ca. 500 gCO₂eq/kWh voor gas en ca. 1000 gCO₂eq/kWh voor kolen⁵. Net als zon- en windenergie is kernenergie een klimaatvriendelijke optie voor elektriciteitsproductie die kan bijdragen aan het halen van de doelstellingen van het Akkoord van Parijs⁶, zoals de maximale temperatuurstijging van 1,5°C. Dat doel impliceert netto nul CO₂-emissies in 2050⁷.

Voorzieningszekerheid

Uranium, de brandstof voor kernenergie, is ruim voorradig op aarde. De beschikbaarheid wordt op basis van de huidige jaarlijkse consumptie ingeschat op minimaal honderd jaar⁸. Voordelen van kernenergie in termen van voorzieningszekerheid zijn:

- Schommelingen in de uraniumprijs hebben slechts een bescheiden effect op de productieprijs van elektriciteit⁹;
- Uranium heeft een hoge energiedichtheid;
- Uraniumvoorraden zijn relatief gemakkelijk aan te leggen.

¹ GWe staat voor Gigawatt elektrisch vermogen.

² Bron: International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reaction Information System (PRIS), 2019.

³ MWe staat voor Megawatt elektrisch vermogen.

⁴ LCA: *Life Cycle Analysis*.

⁵ Bron: Van der Zwaan, 2013.

⁶ 2015 United Nations Framework Convention on Climate Change Conference (COP21).

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018.

⁸ Nuclear Energy Agency (NEA) / International Atomic Energy Agency (IAEA), 2018.

⁹ Bron: Bunn et al., 2005.

Het bouwen van kerncentrales en het verrijken van uranium vergen technologie, expertise en capaciteit die slechts in een beperkt aantal landen beschikbaar zijn. Hierdoor kan afhankelijkheid ontstaan van landen die daarover beschikken. Nederland beschikt over slechts een deel van de benodigde technologie, expertise en capaciteit.

Nieuwbouw

In de EU worden gedurende het komende decennium waarschijnlijk meer kerncentrales gesloten dan dat er nieuwe gebouwd worden, zodat het relatieve aandeel van kernenergie in de totale elektriciteitsproductie vermoedelijk zal afnemen. In de EU zijn op dit moment vier kernreactoren in aanbouw: één in Finland (Olkiluoto, sinds 2005), één in Frankrijk (Flamanville, sinds 2007) en twee in het Verenigd Koninkrijk (Hinkley Point, sinds 2018). Deze vier kernreactoren zijn zogenaamde EPRs (European Pressurised Water Reactors) van elk ca. 1650 MWe. Aan de bouwtijd (recentelijk soms oplopend tot 10-15 jaar) kunnen enkele jaren voorafgaan voor het verkrijgen van vergunningen. De markt van kernreactorproducenten wordt gedomineerd door enkele bedrijven uit een klein aantal landen, waaronder China, Duitsland, Frankrijk, Japan, Rusland, de Verenigde Staten en Zuid-Korea.

Kernafval

De hoeveelheid afval bij de productie van kernenergie is in omvang zeer beperkt. De radioactiviteit en toxiciteit van kernafval zijn echter zeer schadelijk voor mens en milieu. Kernafval blijft radioactief gedurende duizenden jaren; sommige in kernreactoren geproduceerde isotopen blijven miljoenen jaren radioactief. Voor kernafval bestaan momenteel twee soorten opslag: bovengronds (in containers of bunkers zoals in Nederland en de Verenigde Staten) of in de diepe ondergrond (in geologische lagen, zoals in Finland, Frankrijk en Zweden). In Nederland wordt al het laag-, middel- en hoogradioactief afval, waaronder dat van kerncentrales, verwerkt en voor honderd jaar veilig opgeslagen bij de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) in Zeeland¹⁰. Hierna vindt, volgens de huidige stand van wetenschap en techniek, eindberging plaats in de diepe ondergrond.

Veiligheid

De ontwikkeling van kernenergie is afgeremd door drie ernstige ongelukken: Three Mile Island (Verenigde Staten, 1979), Tsjernobyl (Sovjet-Unie, 1986) en Fukushima (Japan, 2011). De ongelukken van Tsjernobyl en Fukushima hadden verstrekende gevolgen: ze veroorzaakten een radioactieve besmetting van mensen en van de omgeving, en maakten evacuatie van een deel van de bevolking noodzakelijk. Zoals elke andere industriële activiteit doen zich bij kernenergieproductie regelmatig kleine incidenten voor. Veel van de 54 kernreactoren die nu wereldwijd in aanbouw zijn, zijn van het generatie-III-type, dat als veiliger beschouwd wordt dan zijn voorgangers. De kans op grote ongelukken blijft echter aanwezig, omdat naast technische ook menselijke factoren een rol spelen.

Proliferatie

Het gebruik van kernenergie voor civiele doeleinden zoals energieproductie vergemakkelijkt het gebruik van nucleaire materialen of technologieën voor militaire doeleinden zoals kernwapenproductie¹¹. Het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA) in Wenen heeft als taak, naast het bevorderen van het veilig gebruik van kernenergie, het voorkómen van de proliferatie van nucleaire materialen of technologieën voor militaire doeleinden. Het gebruik van kernenergie kan ook het risico van terrorisme vergroten, zowel door potentiële agressie gericht op kerncentrales als door de mogelijkheid kernafval te gebruiken voor het fabriceren van zogenaamde 'vuile bommen'.

¹⁰ Bron: Verhoef, 2019.

¹¹ Bron: International Panel on Fissile Materials (IPFM), 2019 ('Fissile materials' zijn splijtstoffen).

Beleid andere EU-lidstaten

Door haar nadelen is kernenergie voor sommige mensen een onaantrekkelijke methode voor elektriciteitsproductie¹². Verschillende landen hebben mede door beperkte publieke acceptatie besloten kernenergie uit de nationale energiemix te houden (zoals Italië en Oostenrijk) of te halen (zoals Duitsland en België). In Frankrijk, waar kernenergie momenteel goed is voor zo'n 75% van de totale elektriciteitsproductie, is deze vorm van energieopwekking meer geaccepteerd. Kernenergie blijft daar de komende decennia dan ook een belangrijk onderdeel van de nationale infrastructuur voor elektriciteitsproductie.

Kosten

De kosten van kernenergie verschillen per land en per type kernreactor, en zijn afhankelijk van o.a. schaalgrootte en de rol van de overheid. De investeringskosten¹³ voor kernenergie zijn in Europa de afgelopen jaren gestegen, van 1900-2700 €(2017)/kWe¹⁴ in 2007 tot 3600-7200 € (2017)/kWe in 2018¹⁵. De redenen hiervoor zijn met name de extra veiligheidsmaatregelen in de nieuwe generatie-III-kernreactoren en de *first-of-a-kind*-aard van de bouw van deze kernreactoren tot nu toe. Andere factoren die waarschijnlijk een rol hebben gespeeld: een toename van materiaalkosten en de noodzaak op-nieuw constructiekennis en -vaardigheden op te doen na een lange periode waarin zowel in Europa als in de Verenigde Staten geen kernreactoren zijn gebouwd. De relatieve concurrentiepositie van kernenergie in Europa is de afgelopen tien jaar verzwakt door factoren als langere constructietijden, hogere financieringskosten en de verbeterde concurrentiepositie van hernieuwbare energiebronnen. Toch kan kernenergie in specifieke landen en onder de juiste omstandigheden, en in principe ook in Nederland, nog steeds een concurrerende optie zijn voor elektriciteitsproductie, met productiekosten¹⁶ van 65-120 €(2017)/MWh¹⁷. De bandbreedte in deze kosten wordt mede bepaald door de veronderstelde levensduur van kerncentrales, de beschikbaarheidsfactor en de discontovoet¹⁸. Kernenergie kan concurreren worden door factoren als schaalgrootte voor nieuwbouw, levensduurverlenging voor bestaande reactoren en financiële risicobeheersing¹⁹.

Conclusie

Individuele landen wegen de voor- en nadelen van kernenergie op verschillende wijze, wat zichtbaar wordt door diversiteit in standpunten en beleid. Sommige landen zonder kernenergie overwegen kernenergie in de nationale energiemix op te nemen of hebben dat reeds besloten (bijvoorbeeld in het Midden-Oosten), terwijl andere landen (met name in Azië) al bezig zijn kernenergie een aanzienlijke rol in de elektriciteitsproductie te geven. Sommige aspecten van kernenergie kunnen duurzaam genoemd worden²⁰. Kerncentrales stoten niet alleen geen CO₂ uit, maar ook geen NO_x, SO_x en fijnstof. De relatieve bijdrage van kernenergie in de wereldwijde elektriciteitsproductie is de afgelopen jaren gedaald (van ca. 17% in 2010 tot ca. 10% in 2019) en de toekomst ervan blijft onzeker. In de meeste publicaties met energie- en klimaatscenario's blijft kernenergie tot minimaal het midden van de eeuw een significante rol spelen in de wereldwijde energiemix²¹.

¹² Bron: NEA, 2010.

¹³ *Overnight capital costs*, of OCC.

¹⁴ De aanduiding €(2017) betekent dat het gaat om euro's uit 2017.

¹⁵ Bron: Scheepers et al. 2007; Gamboa Palacios en Jansen, 2018 (kWe: kilowatt elektrisch vermogen). Voor het bouwen van een nieuwe kerncentrale in Nederland zou momenteel deze bandbreedte voor 2018 van toepassing zijn.

¹⁶ *Levelised cost of electricity*, of LCOE: deze productiekosten dekken in principe de kosten van de gehele kernenergiecyclus, inclusief die van bijvoorbeeld de verwerking en opslag van kernafval.

¹⁷ Bron: IEA/NEA, 2015; Gamboa Palacios en Jansen, 2018.

¹⁸ De discontovoet drukt uit dat kosten vandaag niet hetzelfde zijn als in de toekomst; informatie die nodig is voor de berekening van de LCOE (voetnoot 15).

¹⁹ Bron o.a. MIT, 2018.

²⁰ Bron: Bruggink en Van der Zwaan, 2002.

²¹ Bron: IEA-WEO, 2018

Referenties

- Bruggink, J.J.C. and B.C.C. van der Zwaan, 2002, "The role of nuclear energy in establishing sustainable energy paths", *International Journal of Global Energy Issues*, 18, 2/3/4, 151-180.
- Bunn, M., S. Fetter, J.P. Holdren and B.C.C. van der Zwaan, 2005, "The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel", *Nuclear Technology*, 150, June, 209-230.
- COP-21, 2015, Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties 21, Paris, France.
- Gamboa Palacios, S. and J. Jansen, 2018, "Nuclear energy economics: An update to Fact Finding Nuclear Energy (ECN, 2007)", TNO 2018 P11577, 29 November 2018.
- IAEA-PRIS, 2019, International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), see: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>.
- IEA/NEA, 2015, "Projected Costs of Generating Electricity", International Energy Agency (IEA) and Nuclear Energy Agency (NEA), OECD, Paris, France.
- IEA-WEO, 2018, "World Energy Outlook" (WEO), International Energy Agency, OECD, Paris, France.
- IPCC, 2018, "Special Report on Global Warming of 1.5°C", Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPFM, 2019, International Panel on Fissile Materials, Princeton University, USA, see: www.fissilematerials.org.
- MIT, 2018, "The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World", MIT Energy Initiative.
- NEA, 2010, "Public Attitudes to Nuclear Power", Nuclear Energy Agency, OECD, Paris, France.
- NEA/IAEA, 2018, "Uranium 2018: Resources, Production and Demand", Nuclear Energy Agency (NEA) and International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Scheepers, M.J.J., A.J. Seebregts, P. Lako, F.J. Blom, F. van Gemert, 2007, "Fact Finding Kernenergie", t.b.v. de SER-Commissie Toekomstige Energievoorziening, ECN-B-07-015.
- Van der Zwaan, B.C.C., 2013, "The Role of Nuclear Power in Mitigating Emissions from Electricity Generation", *Energy Strategy Reviews*, 1, 296-301.
- Verhoef, E., 2019, "Radioactief Afval in Nederland", *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, Mei 2019, 16-19.

ADDENDUM: KERNENERGIE IN DE PRAKTIJK

Auteur: Prof. dr. Bob van der Zwaan, Universiteit van Amsterdam en TNO, 9 september 2019

Hoofdvraag

TNO is gevraagd om een toegepast-wetenschappelijke factsheet waarin wordt ingegaan op praktische aspecten, zoals de kosten van kernenergie en kernafval. Hieronder enkele toevoegingen op de factsheet “Kernenergie in de Praktijk”, d.d. 27 mei 2019, n.a.v. aanvullende vragen vanuit de Tweede Kamer.

Investeringskosten

Er wordt energieproducenten weinig in de weg gelegd om kerncentrales te bouwen. Toch blijken investeerders in Nederland slechts beperkt geïnteresseerd in nieuwbouw van kerncentrales. Regulering, het verkrijgen van vergunningen, het bepalen van een geschikte locatie en publieke acceptatie spelen hierbij een rol. De hoogte van de investeringskosten is hierin een andere belangrijke factor. Per kWe zijn de kosten van kernenergie aanzienlijk hoger dan voor andere elektriciteitsproductieopties (in Europa 3600-7200 € (2017)/kWe in 2018).²² Daarmee zou een in Nederland te bouwen EPR²³ (ca. 1650 MWe) momenteel een investering van 6-12 miljard € vergen. Voor het deel hiervan dat elektriciteitsproducenten moeten lenen, zullen relatief hoge rentevoeten gerekend worden als gevolg van onzekerheden over bijvoorbeeld mogelijke vertragingen bij de bouw van een kerncentrale. Een verlaging van de investeringskosten en van de rentevoet zou de aantrekkelijkheid van nieuwbouw van kerncentrales voor energieproducenten en investeerders kunnen vergroten.

Overheid

Een grotere rol van de overheid (publiek-private samenwerking) bij het afdekken van risico's op kostenescalaties, bijvoorbeeld ten gevolge van vertragingen bij de bouw van kerncentrales, zou de financiering ervan kunnen vergemakkelijken en de interesse van investeerders mogelijk vergroten. Indien de overheid in staat en bereid zou zijn om bijvoorbeeld een (groter) deel van de kosten van opslag van radioactief afval en/of van het ontmantelen van kerncentrales aan het einde van hun levensduur voor haar rekening te nemen, of garant zou kunnen staan voor de kosten verbonden aan de gevolgen van eventuele ongelukken met kerncentrales, dan zou dat een positieve werking kunnen hebben op de bereidheid van elektriciteitsproducenten om nieuwe kerncentrales te bouwen.

Constructieduur

In de EU zijn twee kernreactoren in aanbouw waarvan de constructietijd meer dan tien jaar is geworden: een reactor in Finland (Olkiluoto, sinds 2005) en een reactor in Frankrijk (Flamanville, sinds 2007). De bouwtijd van deze twee kernreactoren (beide EPR's) is aanzienlijk opgelopen door uiteenlopende oorzaken, m.n. gelieerd aan het feit dat het een nieuw soort kernreactoren betreft die nog niet eerder gebouwd zijn. Zo speelt een rol dat er nu strengere veiligheidscriteria dan voorheen gelden, wat tot een verlenging van de constructietijd heeft geleid. Andere factoren die de constructietijd nadelig beïnvloeden zijn het feit dat het 'first-of-a-kind'-reactoren zijn, dat er gedurende een lange periode in Europa nauwelijks kerncentrales gebouwd zijn en dat er nog geen profijt getrokken kan worden van schaafeffecten voor de EPR.

²² Bron: Scheepers et al., 2007; Gamboa Palacios en Jansen, 2018.

²³ EPR: European Pressurized Reactor, een generatie III-type kernreactor

Elektriciteitskosten

De International Energy Agency (IEA) en de Nuclear Energy Agency (NEA) publiceren regelmatig, met een interval van enkele jaren, het standaardwerk *'Projected Costs of Generating Electricity'*, waarin gerapporteerd wordt over de kosten van de belangrijkste elektriciteitsproductieopties, waaronder kolen, gas, kernenergie, zon- en windenergie.²⁴ Een van de hoofdconclusies van de laatste editie in deze breed gedragen serie is dat de kosten voor *baseload*²⁵ -opties zoals kernenergie, na een flinke toename rond 2010, recent zijn gestabiliseerd. Een andere conclusie is dat hernieuwbare opties zoals zonne-energie sterk in kosten zijn gedaald, en dat dit inmiddels concurrerende technologieën zijn geworden. Het rapport laat zien dat de kosten van verschillende elektriciteitsproductieopties afhankelijk zijn van het land waarin deze gebouwd en gebruikt worden, van marktomstandigheden en beleidsinstrumenten, en van specifieke technologiekeuzes. Ook wordt geconcludeerd: *"there is no single technology that can be said to be the cheapest under all circumstances"*.²⁶

Baseload

Er bestaan veel mogelijkheden om met de variabiliteit van zon- en windenergie om te gaan, de samenleving van elektriciteit te voorzien als de zon niet schijnt of de wind niet waait, en voldoende aanbod te genereren gedurende intervallen met grote vraag. Het inzetten van aardgascentrales of kerncentrales zijn slechts enkele opties die aangewend kunnen worden als zon- en windenergie onvoldoende elektriciteit leveren. Aardgascentrales kunnen sneller aan- en uitgeschakeld worden dan kernenergiecentrales, zodat eerstgenoemde zich gemakkelijker lenen voor dit doel. Een zeker zo belangrijk argument is echter dat de hoge investeringskosten, benodigd voor kernenergie, impliceren dat een elektriciteitsproducent een kerncentrale het liefst zoveel mogelijk uren laat draaien (baseload), waardoor kernenergie zich minder goed leent voor het leveren van elektriciteit bij gebrek aan hernieuwbare bronnen, of gedurende hoge vraag (peakload), dan een aardgascentrale.

Ten slotte

Omdat de relatieve bijdrage van kernenergie aan de wereldwijde elektriciteitsproductie gedurende dit decennium sterk is gedaald – van ca. 17% in 2010 tot ca. 10% in 2019 – en de komende decennia deze relatieve bijdrage mogelijk verder daalt, wordt door sommige energie-experts kernenergie een *20e-eeuwse* technologie genoemd. De relatieve bijdrage van zon- en windenergie aan de wereldwijde elektriciteitsproductie is gedurende dit decennium juist sterk gestegen, en zal de komende decennia waarschijnlijk blijven stijgen, waardoor deze opties *21e-eeuwse* technologieën genoemd kunnen worden. Deze ontwikkeling vormt mogelijk een aanvullende verklaring voor de beperkte interesse van energieproducenten in het bouwen van nieuwe kerncentrales in een land als Nederland.

²⁴ Bron: IEA/NEA, 2015.

²⁵ Baseload: de minimale hoeveelheid elektriciteit die geleverd moet worden voor 24-uurs energievoorziening.

²⁶ Bron: IEA/NEA, 2015.

Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NWO, TNO en VSNU bemiddelen tussen parlementaire kennisvraag en wetenschappelijk kennisaanbod. De informatie in het kader van Parlement en Wetenschap is afkomstig van vooraanstaande wetenschappers, maar niet onderworpen aan peer review en niet door de wetenschapsorganisaties geverifieerd.



Tweede Kamer
DER STATEN-GENERAAL



Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NWO, TNO en VSNU bemiddelen tussen parlementaire kennisvraag en wetenschappelijk kennisaanbod. De informatie in het kader van Parlement en Wetenschap is afkomstig van vooraanstaande wetenschappers, maar niet onderworpen aan peer review en niet door de wetenschapsorganisaties geverifieerd.



Tweede Kamer
DER STATEN-GENERAAL

