



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 verstrekkende 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 concurrerder 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.

Investeringsen

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 nadeling 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



KNAW



TNO