



# Parlement en Wetenschap

## KERNENERGIE IN EEN CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteit. In 2017 verzorgden 445 kernreactoren<sup>1</sup> met een totaal geïnstalleerd vermogen van 396 GWe<sup>2</sup> ruim 10% van de mondiale elektriciteitsproductie<sup>3</sup>. 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)<sup>4</sup>. 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 2034<sup>5</sup>. 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 blijven<sup>6</sup>. 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 verdedigingslijnes 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 veiligheidsprincipes<sup>7</sup> gebaseerd.

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

<sup>2</sup> GWe staat voor Gigawatt elektrisch

<sup>3</sup> Bron: World Nuclear Association (WNA), 2019

<sup>4</sup> Respectievelijk Light-Water Reactor, Pressurized-Water Reactor en Boiling-Water Reactor

<sup>5</sup> Bron: Kerncentrale Borssele, 2018

<sup>6</sup> Bron: OECD, 2012 (in referentielijst 'OECDa')

<sup>7</sup> 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 is<sup>8</sup>. 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 jaar<sup>9</sup>. 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 (GIF<sup>10</sup>).

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 zijn<sup>11</sup>. 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 eenheden<sup>12</sup> 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 kernsplijtingsafval met een hoge radiotoxiciteit<sup>13</sup> tot driehonderd jaar na productie. Daarnaast produceren reactoren ook stoffen zwaarder dan uranium, zoals plutonium. Deze blijven radiotoxisch tot tweehonderdduizend jaar na productie.

<sup>8</sup> Bron: Goldberg, 2011

<sup>9</sup> Bron: Nuclear Energy Agency (NEA), 2018

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

<sup>11</sup> 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.

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

<sup>13</sup> 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’<sup>14</sup> en wordt in verglaasde vorm<sup>15</sup> gebracht voor opslag in de diepe ondergrond. In Nederland wordt het afval eerst opgeslagen bij COVRA<sup>16</sup> voor een periode van minimaal honderd jaar. Per jaar produceert Kerncentrale Borssele slechts 1,5 m<sup>3</sup> 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 vierdegeneratierectoren 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 klei<sup>17</sup>, honderdsten tot duizendsten van procenten voor opslag in zout en graniet<sup>18</sup>).

## 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 elektriciteitsnet<sup>19</sup>. 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.

<sup>14</sup> *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

<sup>15</sup> Verglazen: in massief glas insluiten

<sup>16</sup> Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval – zie website

<sup>17</sup> Bron: Onderzoeksprogramma Eindberging Radioactief Afval (OPERA), 2018

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

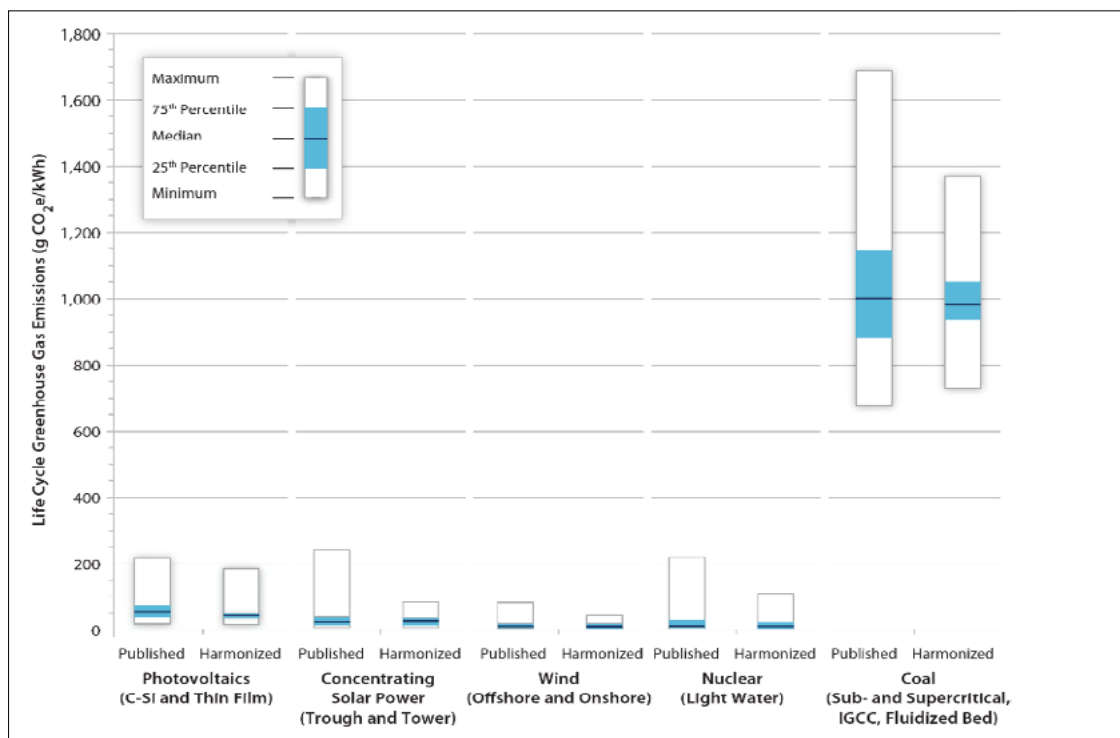
<sup>19</sup> “Kerncentrales zijn regelbaar. Zo gaat de scenariostudie van de Universiteit Utrecht (UU) ervan uit dat een kerncentrale met een vermogen van 1500 MW teruggeregeld kan worden tot 300 MW en dat op- en afregeling mogelijk is met 75 MW per minuut. Als de centrale op de ellast draait neemt 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’<sup>20</sup> 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 lastvolgedrijf 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 gascentrales<sup>21</sup>.

## CO<sub>2</sub> -productie

De CO<sub>2</sub> -emissie bij de productie van elektriciteit door kerncentrales behoort tot de laagste van alle productiemethoden. Dit beeld verandert niet als de CO<sub>2</sub> -uitstoot tijdens de constructie en ontmanteling van kerncentrales en in de splijtstofcyclus wordt meegenomen. Figuur 1 geeft de geharmoniseerde uitkomst van 2.100 studies<sup>22</sup>. Hieruit blijkt dat kernenergie per eenheid elektriciteit tot een broeikasgasemissie leidt die vergelijkbaar is met die van zon-PV<sup>23</sup> en wind. Dit verklaart dat de CO<sub>2</sub> -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/kWh<sup>24</sup>.

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.

<sup>20</sup> Nuclear Energy Institute (NEI), 2012

<sup>21</sup> OECD, 2012 (in referentielijst: OECDb)

<sup>22</sup> Bron: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013

<sup>23</sup> Zon-PV: het opvangen en omzetten van zonne-energie wordt zon-PV genoemd (PV van photovoltaic cell).

<sup>24</sup> 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 bedraagt<sup>25</sup>. Om de kostprijs van elektriciteit te bepalen moeten dus de kosten van het gehele energiesysteem worden berekend.

Een CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening bestaat typisch uit een mix van:

- Variabele hernieuwbare energiesystemen<sup>26</sup> 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 CO<sub>2</sub>-uitstoot zoals bij gascentrales met opvang en opslag van CO<sub>2</sub> (CCS<sup>27</sup>) of kerncentrales. Biomassacentrales met CCS zouden (in theorie) zelfs tot een netto negatieve CO<sub>2</sub>-emissie kunnen leiden.

De transitie naar een CO<sub>2</sub>-vrij energiesysteem is erop gebaseerd de elektriciteitsproductie zo snel mogelijk CO<sub>2</sub>-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's<sup>28</sup> laat zien dat scenariostudies uiteenvallen in twee groepen:

- A. Studies waarbij de elektriciteitsproductie volledig is gebaseerd op hernieuwbare energie, gecombineerd met seizoenopslag.
- 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%<sup>29</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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 B<sup>30</sup>.

<sup>25</sup> Bron: OECD, 2012 (in referentielijst: OECDb)

<sup>26</sup> Ofwel 'Renewable Energy Systems' (RES)

<sup>27</sup> 'Carbon capture and storage'.

<sup>27</sup> Nuclear Energy Institute (NEI), 2012

<sup>28</sup> BRON: JENKINS, 2018

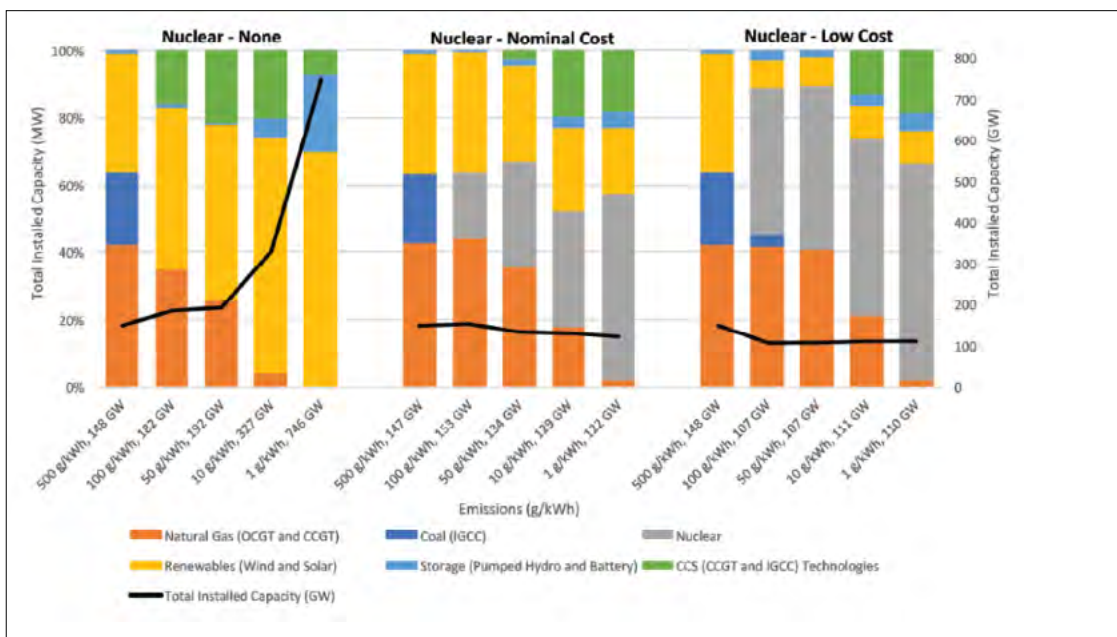
<sup>29</sup> BRON: OECD, 2019

<sup>30</sup> BRON: JENKINS, 2018

Een recente studie van het MIT Energy Initiative<sup>31</sup> laat zien dat in een optimale energiemix het aandeel kernenergie sterk toeneemt als de toegestane CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 Europa<sup>32</sup> laten zien dat in een CO<sub>2</sub>-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 gevoeligheidsstudie<sup>33</sup> 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 CO<sub>2</sub>-emissie met de kostprijs van kernenergie als parameter (MIT, 2018).

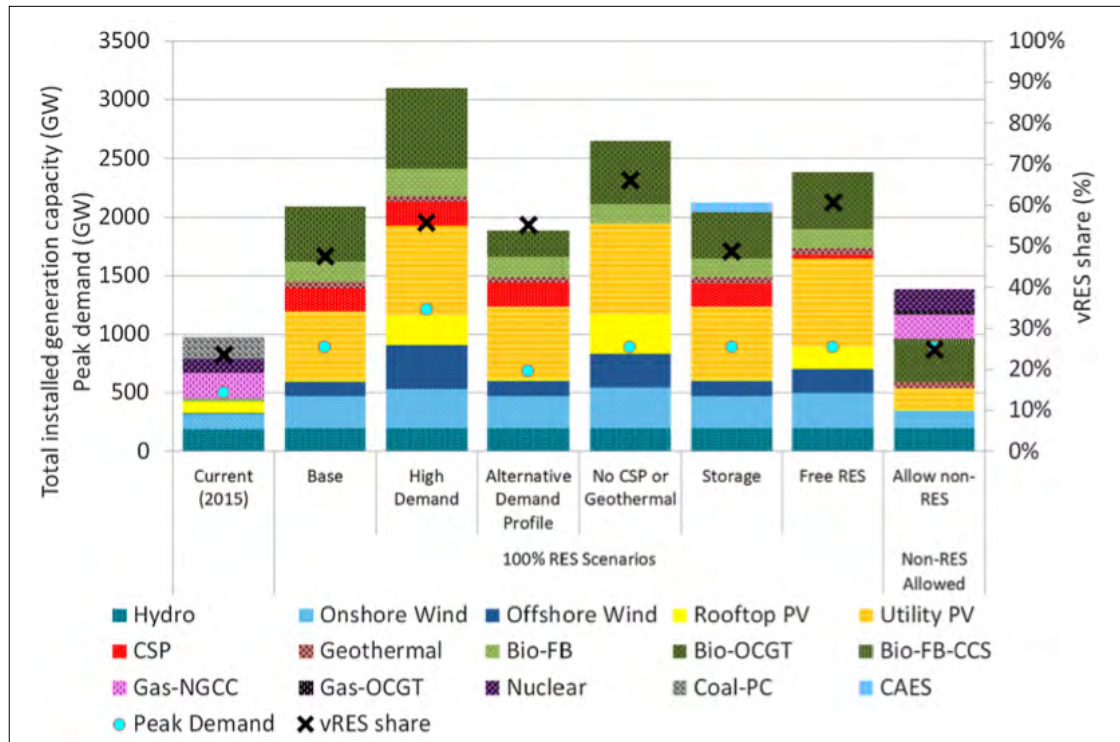
<sup>31</sup> Bron: MIT, 2018

<sup>32</sup> W. Zappa, 2019

<sup>33</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-vrij energiesysteem is een fors aandeel van CO<sub>2</sub>-vrij en regelbaar vermogen nodig, of een zeer grote overcapaciteit van hernieuwbare energie.
- Kernenergie is goed regelbaar en is goedkoper dan andere opties voor CO<sub>2</sub>-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, Likhov, 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](http://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

