



# 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.

Prof. Dr Wim C. Turkenburg, Universiteit Utrecht

23 oktober 2019

### 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 aarde<sup>1</sup> 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 stijgen<sup>2</sup>.

Tijdens de Klimaatconferentie van Parijs<sup>3</sup> 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 CO<sub>2</sub>. De concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer is toegenomen van 270 ppm<sup>4</sup> vóór het industriële tijdperk naar zo'n 410 ppm nu. Jaarlijks komt daar circa 2½ ppm bij. Voor een overgroot deel is dit CO<sub>2</sub> 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 TWh<sup>5</sup>/jaar). Daarmee dekt kernenergie thans ongeveer 4½ % (ca. 27 EJ<sup>6</sup>/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 CO<sub>2</sub>-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

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

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

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

<sup>4</sup> ppm: parts per million.

<sup>5</sup> TWh: TeraWattuur, ofwel 10<sup>12</sup> Wattuur.

<sup>6</sup> EJ: Exajoule, ofwel 10<sup>18</sup> joule.

juist een afname laten zien<sup>7</sup>. De bevindingen worden als volgt samengevat: *“In de meeste 1,5-grad 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”*<sup>8</sup>.

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 2017<sup>9</sup>.

## Randvoorwaarden elektriciteitsvoorziening in 2050

Om de klimaatdoelstelling van Parijs te kunnen halen moet in Europa de uitstoot van CO<sub>2</sub> 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 ontwikkeld<sup>10</sup> 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 CCS<sup>11</sup>; inzet van aardgas met of zonder CCS; verdere uitbouw van hoogspanningsnetten in Europa, het direct uit de lucht halen van CO<sub>2</sub> (DAC<sup>12</sup>), 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 gepubliceerd<sup>13</sup>. 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 (JRC<sup>14</sup>) 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.

<sup>7</sup> Bron: IPCC, Global Warming of 1.5°C, ‘Special Report, 2018, ch. 4.3.1.3.

<sup>8</sup> Bron: IPCC, 2018, ch. 2.4.2.1.

<sup>9</sup> Zie: IPCC, 2018, Fig. 3b.

<sup>10</sup> Op basis van extern verkrijgbare programmatuur, PLEXOS genaamd

<sup>11</sup> CCS: Carbon Capture and Storage ofwel CO<sub>2</sub>-afvang en –opslag.

<sup>12</sup> DAC: Direct Air Capture

<sup>13</sup> 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).

<sup>14</sup> 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 <sub>2</sub> )	400	65½	10	1
Omzetting H <sub>2</sub> 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-PV<sup>15</sup>, 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 Cycle<sup>16</sup> succesvol verloopt. Deze technologie zou een aardgascentrale met nul-emissie van CO<sub>2</sub> bij een verhoogd omzettingsrendement en verlaagde investeringskosten mogelijk moeten maken<sup>17</sup>.

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 CO<sub>2</sub>-emissiereductie. In het eerste alternatief werd geëist dat tenminste 70% van de gebruikte stroom in West-Europa door zon-PV- of windvermogen wordt opgewekt<sup>18</sup>. 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 CO<sub>2</sub>-uitstoot van het elektriciteitssysteem in West-Europa negatief zou zijn, te weten -1,1 gigaton<sup>19</sup> per jaar.

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

<sup>16</sup> Allam Cycle: het proces van omzetting van fossiele brandstoffen in mechanische energie met behulp van zuivere zuurstof, waarbij het werkmedium voor de turbine CO<sub>2</sub> en water is en wordt afgevangen. De cyclus is genoemd naar zijn ontwikkelaar, Rodney John Allam.

<sup>17</sup> 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.

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

<sup>19</sup> 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 aanzienlijk<sup>20</sup>.

Wanneer het gebruik van CCS in de elektriciteitsvoorziening niet wordt toegestaan en we toch nul-emissie van CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 speelt<sup>21</sup>. 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.

<sup>20</sup> 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

<sup>21</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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



**KNAW**

