

Wetenswaardigheden nieuwe, kleinere kerncentrales (SMR)

Herman Damveld, 4 november 2024

Inleiding

Rob Jetten (D66), de vorige minister van Klimaat en Energie, had het op 11 november 2023 over nieuwe kerncentrales, die vaak omschreven worden als ‘kleine kerncentrales.’ Hij merkte over de afmetingen van die kleine kerncentrales op dat “veel mensen er een romantisch beeld bij hebben.” Dat is volgens hem onterecht, want de bedrijven die een dergelijke kerncentrale beloven, “bouwen gewoon het formaat van Borssele.”¹ Sophie Hermans (VVD), minister van Klimaat en Groene Groei, kondigde op 17 september 2024 aan “de mogelijkheden om op termijn kleine modulaire kernreactoren te bouwen in Nederland” te laten verkennen en daarvoor 50 miljoen euro beschikbaar te stellen.² Kortom, alle reden om hier dieper op in te gaan.

Inhoudsopgave

- 1. Groot aantal ontwerpen kleinere kerncentrales**
- 2. Negen provincies hebben belangstelling**
- 3. Small Modular Reactor (SMR), wat en waarom?**
- 4. SMR als verzamelnaam voor 23 tot 68 mogelijke kerncentrales**
- 5. Twee concepten voorop in de race: Rolls-Royce en General Electric-Hitachi**
- 6. De Rolls-Royce-kerncentrale**
- 7. De BWRX-kerncentrale van General Electric**
- 8. Economisch en technisch haalbaar?**
- 9. Bouwbesluit in Nederland voor 2033?**
- 10. Veiligheid en kans op groot ongeluk**
- 11. Hoeveel kernafval per kilowattuur en de opslag?**
- 12. Verrijkt uranium, Rusland en meer kernafval**

1. Groot aantal ontwerpen kleinere kerncentrales

De Duitse overheidsinstantie voor de Veiligheid van de opslag van kernafval (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BASE) wees in een op 5 december 2023 verschenen rapport op een groot aantal onbeantwoorde vragen. In dit rapport werden de ontwerpen van 136 kleinere kerncentrales geanalyseerd met als conclusie dat ze weliswaar vaak gebaseerd zijn op al bestaande, oude technische concepten, maar tevens een groot aantal nieuwe uitdagingen met zich meebrengen wat betreft risico's en economische levensvatbaarheid.³ In een op 15 oktober 2023 verschenen analyse in het vakblad Science Direct concluderen de auteurs na een analyse van 19 SMR-ontwerpen dat geen enkele SMR kan concurreren met bestaande duurzame technologieën, ook als rekening gehouden wordt met de infrastructuurkosten van duurzame energie.⁴

Tot voor kort voldeden slechts vier ontwerpen aan genoemd uitgangspunt van Rob Jetten; die van het Britse bedrijf Rolls-Royce en van de Amerikaanse bedrijven NuScale, Westinghouse en General Electric-Hitachi. Op 8 november 2023 besloot NuScale ermee te stoppen.^{5 6} Het Franse elektriciteitsbedrijf EDF heeft op 1 juni 2024 besloten om te stoppen met de plannen voor de zogeheten Nuward-kerncentrale (twee reactoren van elk 170 MW). EDF deelde mee verder te gaan met uitsluitend de bestaande technologie van lichtwaterreactoren en af te stappen van innovaties.^{7 8} Rory O'Neill, directeur overheidszaken van Westinghouse Electric Company UK, stelde op 13 december 2023 dat de AP300 de enige SMR ter wereld is die bewezen technologie toepast, terwijl andere SMR's gebaseerd zijn op onbewezen ontwerpen.⁹ In Nederland wordt de AP300 overigens niet genoemd, maar staan juist de ontwerpen van

Rolls-Royce en General Electric in de belangstelling. Hierna volgt daarom een overzicht van deze twee reactoren.

2. Negen provincies hebben belangstelling

De provincies Gelderland, Utrecht, Noord-Holland, Zuid-Holland, Zeeland, Noord-Brabant en Limburg schuiven in hun onlangs vastgestelde coalitieakkoord de bouw van kerncentrales met een vermogen van 30 tot 470 Megawatt (MW) naar voren als oplossing voor de energieproblemen.^{10 11} Verschillende politieke partijen in Friesland en Drenthe zijn het hiermee eens.^{12 13} Deze kerncentrales worden Small Modular Reactor (SMR) genoemd, dit in tegenstelling tot de kerncentrales van 1.000 tot 1.650 MW die nu in aanbouw zijn. Het lijkt veelal alsof de term SMR doelt op één type kerncentrales, terwijl het in werkelijkheid over tientallen mogelijke typen gaat. In het op 13 september 2024 verschenen Regeerprogramma van PVV, VVD, NSC en BBB staat: “Het kabinet werkt toe naar een nationale visie op SMR’s medio 2025, in overleg met medeoverheden.”¹⁴ Het is dan ook onduidelijk wanneer een besluit tot de bouw van een SMR in Nederland genomen kan worden, terwijl het ook ongewis is hoeveel kernafval een SMR jaarlijks produceert.

3. Small Modular Reactor (SMR), wat en waarom?

Een kernreactor wordt klein genoemd, wanneer het elektrisch vermogen kleiner is dan 500 MW maar groter dan 50 MW. Bij een vermogen van 20-50 MW spreken we over een mini- of micro-SMR.¹⁵ Ter vergelijking: de kernreactor in Borssele is 485 MW.¹⁶ Een voorbeeld van een kleine reactor die elektriciteit produceerde, is de 58 MW kerncentrale die van 1969 tot 1997 in Dodewaard draaide.¹⁷ Bij de ontwikkeling van nieuwe kleine reactoren is de inzet om ze modulair en fabrieksmatig te bouwen. Dan is het een SMR: Small Modular Reactor. ‘Small’ verwijst naar het elektrisch vermogen van de centrale, maar zegt niets over de grootte ervan. De fabrieksmatige aanpak (‘Modular’) betekent dat men hoopt de kosten beter te kunnen beheersen. Ter plekke kunnen dan een paar kerncentrales naast elkaar komen te staan. Ook hoopt men dat de gevolgen van een groot ongeluk met een kleinere kerncentrale minder erg en verstrekkend zullen zijn dan bij de huidige kerncentrales. Na een ernstig ongeluk met de kerncentrale Borssele moet een gebied tot op 10 kilometer afstand geëvacueerd worden. Bij een SMR zou het gebied kleiner zijn, maar dat is tot nu toe niet bewezen.

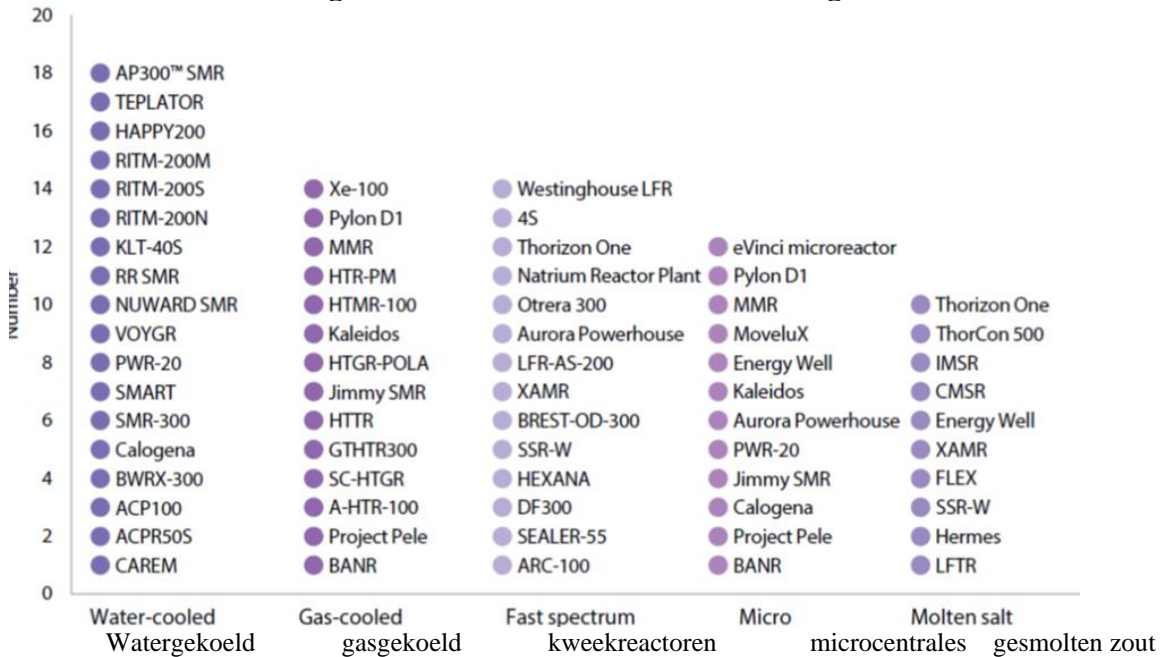
4. SMR als verzamelnaam voor 23 tot 68 mogelijke kerncentrales

Het International Atomic Energy Agency (IAEA) in Wenen gaf in 2020 een overzicht van 60 mogelijke SMR’s met een vermogen tussen 30 en 300 Megawatt (MW).¹⁸ Wat betreft het vermogen zijn ze vergelijkbaar met kerncentrales die tussen 1960 en 1975 gebouwd werden, staat in een in december 2021 verschenen rapport van het Oostenrijkse Forum Wissenschaft & Umwelt. Daarna werden de kerncentrales steeds groter, omdat men op die manier schaalvoordelen zou behalen en de kostprijs per kWh zou dalen. De ervaring heeft sindsdien geleerd dat de kostprijs van elektriciteit uit kerncentrales niet gedaald is en daarom wordt nu op SMR’s met een kleiner vermogen teruggegrepen.¹⁹

In maart en juli 2023, evenals op 28 februari 2024, verschenen rapporten van het Nucleair Energie Agentschap (NEA) in Parijs met een overzicht van 23, resp. 27 en 68 SMR’s met een vermogen van 30 tot 470 MW, die wereldwijd in ontwikkeling zijn. Sommige daarvan zouden kort voor het jaar 2030 te koop zijn en andere later (zie figuur 1).^{20 21 22} Of dat zal lukken is zeer de vraag, blijkt uit een op 14 maart 2023 verschenen rapport van prof. Steve Thomas van de Greenwich University in Engeland. Thomas komt tot zijn conclusie na een analyse van zeven SMR-ontwerpen die mogelijk in Engeland gebouwd zouden kunnen worden, zoals het ontwerp van Rolls-Royce.²³

Uit een op 2 juni 2023 gepubliceerd rapport van Gregory Jaczko, die van 2005 tot 2012 voorzitter was van de Amerikaanse Commissie voor Nucleaire Regelgeving (U.S. Nuclear Regulatory Commission), blijkt dat de Amerikaanse regering van 2012 tot 2016 zo'n 450 miljoen dollar subsidie heeft gegeven voor de ontwikkeling van SMR's. Behalve het ontwerp van de zogeheten NuScale-reactor heeft dit niets opgeleverd.²⁴ Dat werd op 21 juli 2023 bevestigd door Allison Macfarlane, van 2012 tot 2014 voorzitter van de Amerikaanse Commissie voor Nucleaire Regelgeving. Macfarlane gaf aan dat nog geen enkele SMR te koop is, laat staan dat er een vergunning voor is afgegeven.²⁵

Figuur 1
Overzicht 68 kleine tot grotere kerncentrales in ontwikkeling



Bron: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition, 28 februari 2024.

Toelichting: in deze figuur wordt de PWR 20 genoemd, een drukwaterreactor met een elektrisch vermogen van 20 Megawatt naar een ontwerp van Last Energy. Het thermisch vermogen is 60 MW. Twee derde van de energie komt derhalve in het koelwater terecht. Volgens het NEA wordt nog nergens een vergunning voor deze kerncentrale aangevraagd. Last Energy is lid van de Alliantie Limburg.²⁶

Ook gaat het regelmatig over kerncentrales die thorium als brandstof gebruiken. Een betere benaming voor de thoriumreactor is echter de gesmoltenzout-reactor. Dit vanwege het feit dat de brandstof opgelost zit in een zout. Dit type kerncentrales is in ontwikkeling.

Medewerkers van de Chinese Academie van Wetenschappen werken al jaren aan een gesmoltenzout-reactor via een prototype met een vermogen van 2 MW, gevolgd door een 10 MW experimentele reactor die in 2025 in bedrijf moet komen. Commerciële toepassing duurt dan nog minstens tot 2040, stelden ze begin december 2017.²⁷ Het prototype was in september 2021 klaar, zodat het proefdraaien kon beginnen.²⁸ Het Nucleair Energie Agentschap in Parijs concludeerde in een op 24 februari 2021 verschenen rapport dat de technologie voor een brandstofketen met thorium niet op industriële schaal ontwikkeld was. Ook is kernenergie op basis van thorium ingewikkelder dan op basis van uranium.²⁹

5. Twee concepten voorop in de race: Rolls-Royce en General Electric-Hitachi

Uit diverse overzichtsartikelen blijkt dat drie concepten vaak genoemd worden: de Rolls-Royce-reactor, de NuScale-reactor en de General Electric-Hitachi BWRX-300. Het gaat hier om kerncentrales die water gebruiken voor de koeling. Ze heten lichtwaterreactoren ter onderscheiding van bijvoorbeeld Canadese kerncentrales die gebruik maken van een zwaardere waterstofverbinding. Lichtwaterreactor is een verzamelbegrip voor zowel een

drukwaterreactor (pressurized water reactor, PWR) als een kokendwaterreactor (boiling water reactor, BWR).

Tot voor kort was de **NuScale**-reactor een kandidaat, een drukwaterreactor met een vermogen van ca. 77 MW. Het was de bedoeling dat hiervan 4, 6, 8, 10 of 12 eenheden bij elkaar in ‘een bak water’ in de kerncentrale worden geplaatst. De centrale zou hierdoor een vermogen van 308 tot 924 MW krijgen. De ontwikkeling van deze reactor begon in 2003.³⁰ In januari 2023 bleek dat de reactor 53% duurder stroom zou leveren.³¹ Toch kende het Amerikaanse ministerie 1,4 miljard dollar subsidie toe.³² De bouwaanvraag voor een eerste centrale in Idaho (USA) zou naar verwachting begin 2024 ingediend en medio 2026 goedgekeurd worden.³³ Op 8 november 2023 besloten NuScale en de betreffende energiebedrijven in Utah om technische en economische redenen echter te stoppen met de bouwplannen.^{34 35}

6. De Rolls-Royce-kerncentrale

Rolls-Royce is de producent van reactoren voor de Engelse kernonderzeeërs. Deze kernreactoren bouwt en onderhoudt Rolls-Royce al tientallen jaren. Het bedrijf besloot een aantal jaren geleden een zogeheten kleine modulaire drukwaterreactor te ontwikkelen en heeft daarvoor een aparte firma opgericht: Rolls-Royce SMR Ltd.³⁶ De Engelse regering besloot op 9 november 2021 een subsidie van omgerekend 246 miljoen euro te verstrekken voor de ontwikkeling van een kerncentrale met een vermogen van 470 Megawatt (MW); de kerncentrale Borssele is 480 MW. Het ontwerp moest na vijf jaar rijp zijn voor een bouwvergunning, was het plan. Deze eerste kleinere kerncentrale zou omgerekend 2,4 miljard euro kosten.³⁷ Dat is 5.100 euro per kilowatt. Alastair Evans, woordvoerder van Rolls-Royce, stelde op 25 november 2021 in het vakblad NewScientist dat de eerste kerncentrale die in 2031 in bedrijf zou kunnen komen, omgerekend 2,6 miljard euro zou kosten en dat zou naar 2,1 miljard euro dalen bij serieproductie.³⁸

In maart 2022 heeft de Engelse regering het algemene ontwerp van deze kerncentrale aanvaard en daarmee kon de gedetailleerde aanvraag voor een bouwvergunning beginnen.³⁹ In april 2022 noemde de Engelse regering het subsidiebedrag van 240 miljoen euro nogmaals en stelde dat kernenergie in het jaar 2050 zeker drie keer zoveel stroom moet leveren als nu.⁴⁰ Centrales als die van Rolls-Royce werden daarbij nadrukkelijk genoemd. De eerste centrales zouden in Wales of in Cumbria in noordwest Engeland moeten verrijzen op vestigingsplaatsen die al vergund waren voor kerncentrales. In maart 2023 bleek dat Rolls-Royce verwachtte dat de eerste reactor begin jaren 2030 in bedrijf zou kunnen komen.⁴¹ Rolls-Royce SMR Ltd. gaf in februari 2017 al aan dat een binnenlandse markt van 14 kerncentrales niet voldoende is en dat bestellingen uit het buitenland nodig zijn om op den duur financieel uit te kunnen.⁴² Vandaar het zoeken naar verkoop aan b.v. Nederland.

Fabrieksmatige bouw

Rolls-Royce wil een groot deel van de kerncentrale in een fabriek klaarmaken. In juli 2022 werd bekend dat er een paar mogelijke locaties zijn voor een dergelijke fabriek. De bouw zal echter pas beginnen als er een vergunning is voor een reeks kerncentrales.⁴³ Dan komen we ook meer te weten over de veiligheid en de kosten. In afwachting van de noodzakelijke extra subsidie zette Rolls-Royce op 24 februari 2023 de ontwikkeling van de kerncentrale op een lager pitje wegens financiële problemen en tegenvallende orders.⁴⁴

Tien Rolls-Royce-kerncentrales in Nederland?

Het Nederlandse bedrijf ULC-Energy heeft in augustus 2022 gekozen voor een kerncentrale naar een ontwerp van het Engelse Rolls-Royce. Dirk Rabelink, de directeur van ULC-Energy, stelde op 6 oktober 2022 dat wat hem betreft tien van deze kerncentrales in Nederland gebouwd worden.⁴⁵ Op 8 november 2023 ondertekenden BAM Infra Nederland, ULC-Energy

en Rolls-Royce SMR een intentieverklaring voor de bouw van een SMR.⁴⁶ Financiële details over de samenwerking en een tijdpad werden niet genoemd.⁴⁷ Het gaat hier om een kerncentrale met een vergelijkbaar vermogen als Borssele in Zeeland. Het gaat derhalve niet om mini-kerncentrales en het is eveneens onbekend waar ze gebouwd zouden kunnen worden

7. De BWRX-kerncentrale van General Electric

De BWRX is een kokendwaterreactor en maakt gebruik van kenmerken van negen eerdere ontwerpen van General Electric en Hitachi, zoals in Dodewaard. Zie tabel 1, evenals figuur 2 en 3. Wereldwijd zijn er zo'n honderd kokendwaterreactoren gebouwd.⁴⁸

GE-Hitachi Nuclear Energy heeft contacten gelegd of overeenkomsten gesloten voor de bouw van een BWRX in Canada, Tsjechië, Polen, Groot-Brittannië, de Verenigde Staten en Zweden. De planning is dat de kerncentrale over 10 tot 13 jaar in bedrijf komt.^{49 50}

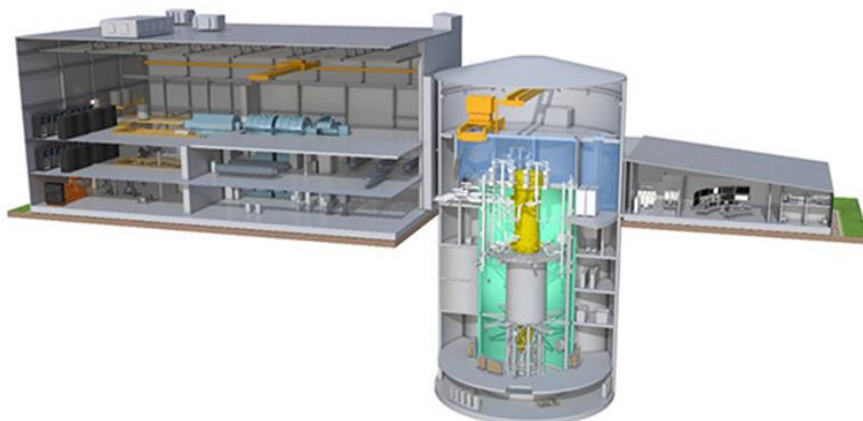
Een voorbeeld. In december 2021 heeft het Canadese bedrijf Ontario Power Generation (OPG) besloten bij Darlington een BWRX te gaan bouwen. OPG hoopte snel een bouwvergunning te krijgen, zodat de kerncentrale in 2028 in bedrijf zou kunnen komen.⁵¹ De bouwkosten werden begroot op 3.333 \$/kW (3.000 euro/kW) en deze kosten zouden bij seriereproductie kunnen dalen naar 2.250 \$/kW (2.000 euro/kW).⁵² In februari 2024 verwachtte OPG dat de overheid eind 2024 zal bepalen of er een bouw- en bedrijfsvergunning afgegeven zou kunnen worden. Daarna kan OPG definitief tot de bouw besluiten.⁵³

De omhulling van de BWRX-300 is een verticale cilinder met een doorsnede van 17,5 meter; de reactor is 38 meter hoog en omvat het reactordrukvat en verschillende componenten. Voor de bouw is een gebied van bijna 14 hectare nodig (figuur 4).⁵⁴

Tabel 1
Kerncentrales GE en Hitachi vanaf 1960

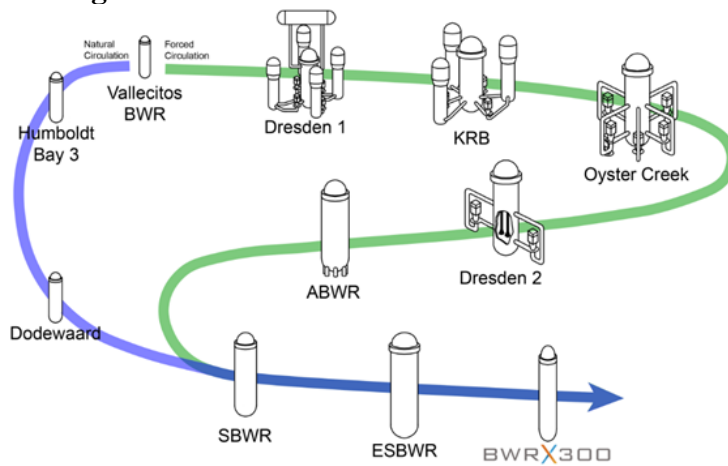
TYPE	BEGIN BEDRIJF
BWR/1	1960
BWR/2	1969
BWR/3	1971
BWR/4	1972
BWR/5	1978
BWR/6	1981
ABWR	1996
SBWR	
ESBWR	
BWRX-300	

Figuur 2
Doorsnede BWRX



Bron: <https://nuclear.gepower.com/bwrx-300>

Figuur 3
Ontwikkeling kokend-water-kerncentrales vanaf 1960



Bron: [https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-\(002\).pdf](https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-(002).pdf), augustus 2023.

Figuur 4
Benodigde ruimte BWRX



Bron: [https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-\(002\).pdf](https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-(002).pdf), augustus 2023.

Op 3 november 2023 hield Aaldrik Haijer, directeur van Water & Energy Solutions in Groningen, tijdens een VVD-bijeenkomst een pleidooi voor deze kerncentrale: “We hebben de afgelopen vijf jaar een veertigtal studies gedaan met een man of tachtig; en dat deden we in volledige beslotenheid. (...) We hebben 20 locaties in Nederland, die interessant zijn om kerncentrales te bouwen. Eind van dit jaar kiezen we daar drie van en begin volgend jaar maken we bekend wat de eerste locatie is waar we gaan bouwen.” Hij zei er “nu niet mee te

koop te lopen,” maar “ermee naar buiten te komen als we begin volgend jaar de eerste locatie hebben.” Een voorwaarde daarbij is volgens hem instemming van het bestuur op zowel plaatselijk als regionaal niveau.⁵⁵ Tot nu toe hebben we hierover geen nadere berichten vernomen.

De **koeling** van de BWRX gaat via zowel lucht als water. Dit koelsysteem wordt in de literatuur omschreven als droge koeling, wat het idee kan geven dat geen koelwater nodig is. Om dit uiteen te zetten maak ik gebruik van gegevens van de World Nuclear Association en van het Öko Instituut.^{56 57}

In een kerncentrale met zogeheten droge koeling wordt de warmte van de kernsplijting zowel via lucht als via water afgevoerd. Het warme water gaat door metalen buizen die in contact staan met de lucht. In vergelijking met uitsluitend waterkoeling duurt het langer, voordat deze buizen eenzelfde hoeveelheid warmte hebben afgegeven. Het Amerikaanse ministerie van Energie (DOE) publiceerde in 2009 een studie met als conclusie dat dit systeem via de lucht drie tot vier keer zo duur is als via uitsluitend koelwater.

Verskillende SMR-ontwerpen maken toch gebruik van vooral luchtkoeling, zodat deze kerncentrales ook gebouwd kunnen worden op plekken waar minder koelwater is. Het intussen ingetrokken ontwerp van NuScale was gebaseerd op luchtkoeling, waardoor 90% minder koelwater nodig zou zijn. De elektriciteitsproductie zou dan ongeveer 6% lager zijn dan met uitsluitend waterkoeling.

Bij de BWRX is dus ook koelwater nodig, al gebeurt dat niet via een hoge koeltoren. Aan de linkerkant van figuur 4 staat weliswaar ‘cooling towers’, maar dat zijn ongeveer twintig lage torentjes naast elkaar.

De Poolse regering heeft op 8 december 2023 ingestemd met een plan om op zeven locaties BWRX-kerncentrales te bouwen.^{58 59} Dit op voorstel van de investeringsmaatschappij ORLEN Synthos Green Energy.⁶⁰ Daarom heb ik Mariusz Ilnicki, de woordvoerder van deze maatschappij, gevraagd of deze locaties allemaal aan water staan. Hij antwoordde op 12 december 2023 dat Włocławek, Stawy Monowskie en Tarnobrzeg-Stalowa Wola dicht bij een rivier staan en de andere vier niet. Maar dat is op zich geen probleem, schreef hij, omdat een BWRX geen aanzienlijke hoeveelheid koelwater nodig heeft. De uiteindelijke beslissing over de koelmethode moet echter nog gemaakt worden en daarvoor worden de verschillende voor- en nadelen nader bestudeerd.⁶¹

De kerncentrale Dodewaard als voorbeeld

Zoals in figuur 3 aangegeven, is de kerncentrale Dodewaard een voorloper van de BWRX. Een overzicht.

De kerncentrale Dodewaard met een elektrisch vermogen van 54 Megawatt (MW) kwam in maart 1969 in bedrijf en ging in 1997 dicht.^{62 63} Op 17 september 1959 benoemde de SEP (Samenwerkende Elektriciteits Productiebedrijven) de Commissie Kernenergiecentrale. Die kwam op 29 april 1960 met een rapport waarin gepleit werd voor de bouw van een Suspensiereactor (door de KEMA) en van nog een kerncentrale. In mei 1960 stemde de SEP hiermee in. Dit resulteerde in aanbiedingen. Op 1 juni 1961 liet de Commissie Kernenergiecentrale echter weten dat de keuze was gevallen op een kokendwaterreactor van de Amerikaanse reactorleverancier General Electric. De bouw zou 90 miljoen gulden kosten. Het ministerie van Economische Zaken stelde een ontwikkelingsbijdrage van 15 miljoen gulden ter beschikking. Euratom nam voor 8,1 miljoen gulden deel.⁶⁴

Op 11 december noemde de heer Sassen, de Nederlandse vertegenwoordiger bij Euratom, tijdens een persconferentie per ongeluk de naam Dodewaard. Zo werd de locatiekeuze bekend en - blijkens krantenberichten uit die tijd - enthousiast begroet door de bevolking en het gemeentebestuur.⁶⁵

Op 23 september 1964 werd begonnen met het bouwrijp maken van het terrein in Dodewaard. Dit leverde een aantal bezwaarschriften op, omdat op dat moment nog geen hinderwetvergunning was afgegeven. Die kwam, samen met de bouwvergunning, in 1965. Op 25 februari 1965 startte het heiwerk. De centrale leverde op 26 oktober 1968 de eerste stroom aan het koppelnet en werd op 26 maart 1969 door koningin Juliana in gebruik gesteld.⁶⁶ De SEP had “opzettelijk besloten tot een relatief kleine centrale, omdat men voor alles wilde dat er bedrijfservaring werd opgedaan, gepaard aan eigen onderzoek,” waarin “alle eigenschappen van een grote commerciële kerncentrale terug te vinden zouden zijn,” staat in het boek ‘Dodewaard doorgelicht’ en daarom werd “van meet af aan gekozen voor een opzet waarbij een economische elektriciteitsopwekking door de centrale zelf geen rol speelde.”⁶⁷ Met Dodewaard moest de elektriciteitswereld de commerciële opwekking van kernenergie leren. De kerncentrale sloot op 26 maart 1997.⁶⁸ Volgens de planning moeten de huidige eigenaren Vattenfall, Engie, Uniper en EPZ geld reserveren, opdat de kerncentrale vanaf 2045 afgebroken kan worden. Ze hebben in 2016 aangegeven dat de kosten voor de ontmanteling 189,7 miljoen euro zouden zijn. Volgens de ministeries van Financiën en van Infrastructuur en Waterstaat kost de ontmanteling echter meer. De eigenaren van Dodewaard waren het hier niet mee eens en gingen in beroep bij de Raad van State. Op 3 november 2021 heeft de Raad van State de ministers gelijk gegeven.⁶⁹ De ontmanteling kost meer dan 190 miljoen euro. De eigenaren van Dodewaard zouden een nieuwe berekening maken.⁷⁰ In mei 2023 bleek uit een brief van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat dat de ontmanteling 243 tot 334 miljoen euro zal kosten. De eigenaren van Dodewaard zouden dat niet kunnen betalen, liet de minister weten. Daarom gaat de overheid de ontmanteling van de kerncentrale Dodewaard betalen.⁷¹

8. Economisch en technisch haalbaar?

Alle nieuwe kernenergieprojecten zijn economisch en technisch niet haalbaar en ook niet zinvol. Dat blijkt uit een op 7 maart 2023 verschenen analyse van onderzoekers van het Duitse Instituut voor Economisch Onderzoek (DIW). “Kernenergie was, is en blijft technologisch riskant en onrendabel. Ook zogenaamd innovatieve reactorconcepten als de SMR’s, die in werkelijkheid hun oorsprong hebben in de begindagen van kernenergie in de jaren 1950/60, veranderen dit niet,” stelde Christian von Hirschhausen, onderzoeksdirecteur van de afdeling Energie, Transport en Milieu van het DIW. Daarom kan kernenergie geen kosteneffectieve en tijdige bijdrage leveren aan de energievoorziening.⁷²

In een op 27 juni 2023 verschenen studie in opdracht van het DIW analyseerden de auteurs vijftien SMR-projecten waarvan voldoende gegevens beschikbaar waren. Elektriciteit van deze SMR’s zal duurder zijn dan stroom van de huidige zonnepanelen, windmolens of gascentrales.⁷³

9. Bouwbesluit in Nederland voor 2033?

Volgens Wim Turkenburg, emeritus hoogleraar Wetenschap, Technologie en Maatschappij aan de Universiteit Utrecht, zullen de eerste SMR’s in de westerse wereld naar verwachting pas rond 2030 in bedrijf komen. Waarschijnlijk in Noord-Amerika en het Verenigd Koninkrijk: “Pas daarna komen ze mondiaal op de markt. In ons land zullen commercieel en marktconform opererende partijen de resultaten van deze SMR’s willen afwachten, voordat ze besluiten een bepaalde SMR te bouwen. Zo’n besluit valt daarom in ons land, zonder financiële steun van de overheid, niet voor 2033 te verwachten.”⁷⁴

Het nucleaire onderzoeksinstituut NRG in Petten bracht op 17 mei 2023 een rapport uit met eenzelfde conclusie, maar dan in wolliger, technische bewoordingen. Het rapport ging over de bouwtijd van een SMR die al ergens in bedrijf is, dat heet nummer N (NOAK, de ⁿ^{de} van een type): er is “een minimale doorlooptijd van circa 7 jaar voor het traject van

vergunningverlening en bouw van een NOAK SMR (Nth of a kind),” mits “de technologie voldoende bewezen/volwassen is om te beoordelen in een vergunningsproces en de nodige voorzieningen in toereikende mate beschikbaar zijn, zoals financiering, toeleveringsketen, expertise en capaciteit. Een leverancier met voldoende kennis, ervaring en capaciteit in de toeleveringsketen is essentieel.”⁷⁵

De regering van Groot-Brittannië koos op 26 september 2024 vier bedrijven die mee mogen dingen naar orders voor de bouw van SMR's: GE-Hitachi, Holtec, Rolls-Royce en Westinghouse. In 2029 wordt bekend wie de SMR's mag bouwen.⁷⁶

10. Veiligheid en kans op groot ongeluk

Als maatstaf voor de veiligheid van een SMR wordt gebruik gemaakt van een kansberekening, de zogeheten probabilistische veiligheidsanalyse (PSA). Dit is de kans op een beschadiging van de kern van de reactor of op lozingen van radioactieve stoffen naar de omgeving. Het wordt meestal uitgedrukt in kans per jaar. Uit een rapport van het Duitse Öko-Instituut volgt dat de uitkomsten “met de nodige voorzichtigheid worden gebruikt, omdat ze sterk afhankelijk kunnen zijn van de gebruikte methoden en gegevens. Ook moet de rekenmethode nog verder worden ontwikkeld of aangepast voor SMR-concepten. (...) De in getallen uitgedrukte resultaten van de PSA worden altijd sterk beïnvloed door vooral de analyse van het aantal mogelijke ongevallen waarmee rekening wordt gehouden. Het aantal mogelijke ongevallen bij SMR's kan aanzienlijk verschillen van dat met de huidige lichtwaterreactoren.” Er is een kans van 1 op de 10 miljoen per jaar op een beschadiging van de kern van de reactor en van 1 op de 100 miljoen per jaar op een ongeluk waarbij een grote hoeveelheid radioactiviteit vrijkomt.⁷⁷ Daarbij moeten we altijd bedenken dat een groot ongeluk ook morgen kan plaatsvinden.

11. Hoeveel kernafval per kilowattuur en de opslag?

Onderzoekers van Stanford University concludeerden in mei 2022 in het tijdschrift PNAS dat SMR's wat betreft volume mogelijk 2 tot 30 keer zoveel radioactief afval produceren, afhankelijk van het type SMR. Deze conclusie is gebaseerd op een analyse van drie SMR's: de oorspronkelijke NuScale iPWR (ruim 2 x zoveel kernafval), de natrium-gekoelde Toshiba 4S reactor (5 x zoveel kernafval), en de Terrestrial Energy IMSR (30 x zoveel kernafval).⁷⁸

Het Amerikaanse Department of Energy daarentegen stelde in november 2022 dat “de afvalkenmerken van de onderzochte SMR's zowel enkele overeenkomsten met de huidige lichtwaterreactor vertonen als enkele potentieel significante verschillen, zowel positief als negatief”.⁷⁹ Om hoeveel kernafval per SMR het gaat, zal nog moeten blijken.

Anders dan vaak wordt beweerd bieden SMR's geen simpele oplossing voor de opslag van kernafval, is de conclusie van een op 11 januari 2024 verschenen analyse van het Duitse Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): “Integendeel, de eindberging wordt complexer, terwijl de noodzaak van definitieve opslag van kernafval blijft bestaan.”⁸⁰

De Amerikaanse National Academies of Sciences heeft in 2023 een zeer uitgebreid rapport uitgebracht over zo ongeveer alle aspecten van de opslag van radioactief afval van nieuwe kerncentrales zoals de SMR's. Volgens dat rapport is “de belangrijkste conclusie dat geavanceerde reactoren en de bijbehorende splijstofcycli geologische opslagplaatsen voor sommige radioactieve afvalstoffen niet overbodig maken, dat ook geavanceerde reactoren de definitieve verwijdering van radioactieve splijtingsproducten nodig zullen hebben.”⁸¹

Bovendien moeten voor elke geavanceerde reactor ook de veiligheidsrisico's en het mogelijke misbruik van de kernmaterialen worden bestudeerd en opgelost.⁸² Op 9 februari 2024 verscheen een rapport van de Engelse Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM), een commissie die onafhankelijk advies over kernafval geeft aan de regering. Een

belangrijke conclusie van dit rapport is dat de ontwerpers van nieuwe, kleinere kerncentrales te weinig aandacht besteden aan de opslag van kernafval en dat dit echt veel beter moet.⁸³

12. Verrijkt uranium, Rusland en meer kernafval

Een ander onopgelost probleem bij de SMR's is de productie van de brandstof. De meeste SMR's hebben namelijk uranium nodig met een hogere verrijkingsgraad dan de bestaande kerncentrales zoals Borssele. Dit soort uranium heet 'high-assay low enriched uraniumfuel', afgekort HALEU. Terwijl het bij Borssele gaat om ongeveer 5% verrijkt uranium hebben SMR's tussen 10 en 19,99% verrijkt uranium nodig.⁸⁴ Dat is net onder het niveau van 20%. Vanaf 20% heet het 'hoogverrijkt uranium', dat geschikt is voor kernbommen. Momenteel zijn er geen verrijkingsbedrijven buiten Rusland die HALEU kunnen produceren.⁸⁵ De Amerikaanse nucleaire industrie waarschuwde recentelijk dan ook dat de start van sommige SMR-ontwerpen met jaren kan worden vertraagd vanwege het ontbreken van HALEU.⁸⁶ HALEU-brandstof is nodig om de kleinere omvang van de reactorkern te compenseren. Dit betekent onder andere dat meer radioactief afval ontstaat.

De SMR's lossen de problemen van de verwerking van kernafval niet op, staat in een rapport van de Amerikaanse National Academies of Sciences, dat in 2023 verschenen is.⁸⁷

Aanvullend stelde Allison Macfarlane op 21 juli 2023 dat sommige reactorontwerpen aanzienlijk meer hoogradioactief afval per kilowattuur zullen produceren dan de huidige lichtwaterreactoren. Andere ontwerpen maken kernafval dat niet zonder meer geschikt is voor definitieve ondergrondse opslag. Macfarlane merkte op dat deze problemen betrekkelijk weinig aandacht krijgen, maar waarschijnlijk wel zullen bijdragen aan het uiteindelijke prijskaartje van de nieuwe technologie.⁸⁸

¹ <https://dvh.nl/groningen/eemsdelta/Rob-Jetten-D66-haalt-in-Middelstum-uit-naar-Omtzigt-28745434.html>, 11 november 2023.

² <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/begrotingen/2024/09/17/xxiii-klimaat-en-groene-groei-rijksbegroting-2025>, 17 september 2024.

³ https://www.base.bund.de/EN/ns/ni-germany/smr/small-modular-reactors_node.html, 5 december 2023.

⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223015980#sec4>, 15 oktober 2023.

⁵ <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Idaho-SMR-project-terminated>, 9 november 2023.

⁶ <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/uamps-and-nuscale-power-agree-to-terminate-the-carbon-free-power-project>, 8 november 2023.

⁷ <https://www.reuters.com/business/energy/frances-edf-drops-plans-develop-its-own-small-nuclear-reactor-technology-2024-07-01/>, 1 juli 2024.

⁸ <https://reneweconomy.com.au/french-nuclear-giant-scraps-smr-plans-due-to-soaring-costs-will-start-over/>, 2 juli 2024.

⁹ <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/126413/pdf/>, 13 december 2023.

¹⁰ <https://wisenederland.nl/kerncentrales-in-de-provincie/?cn-reloaded=1>, 1 september 2023.

¹¹ <https://www.destentor.nl/home/straks-kleine-kerncentrales-in-gelderland-en-overijssel-heeft-grote-voordelen-naast-wind-en-zon-a7647591/>, 14 november 2023.

¹² <https://lc.nl/economie/Ja21-VVD-BBB-en-PVV-in-Provinciale-Staten-willen-ruimte-voor-kleine-kernreactor-in-Friesland-hoe-haalbaar-is-dat-28741613.html>, 14 november 2023.

¹³ <https://dvh.nl/drenthe/Onderzoek-naar-kerncentrale-in-Drenthe-28752694.html>, 15 november 2023.

¹⁴ <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-f525d4046079b0beabc6f897f79045ccf2246e08/pdf>, 13 september 2024.

¹⁵ <https://milieu.vvm.info/milieu-2023-3-kernenergie/>, juli 2023, nr. 3.

¹⁶ <http://epz.nl/kernenergie>.

¹⁷ <http://www.kernenergiein nederland.nl/node/701>

¹⁸ https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

¹⁹ https://fwu.at/wp-content/uploads/OeSMR_FWU-2021_final.pdf, december 2021.

²⁰ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_78743/the-nea-small-modular-reactor-dashboard, 13 maart 2023.

²¹ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_83555/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-volume-ii, 20 juli 2023.

-
- ²² https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition, 28 februari 2024.
- ²³ <https://www.sgr.org.uk/publications/responsible-science>, 14 maart 2023.
- ²⁴ <https://www.samuellawrencefoundation.org/post/first-friday-series-june-2nd-2023>, 2 juni 2023.
- ²⁵ <https://iai.tv/articles/the-end-of-oppenheimers-energy-dream-auid-2549>, 21 juli 2023.
- ²⁶ Bron: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_83555/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-volume-ii, 20 juli 2023, pagina 36.
- ²⁷ <https://www.deingenieur.nl/artikel/thorium-reactor-heeft-nodige-haken-en-ogen#.Wif69YkWnaE.twitter>, 6 december 2017.
- ²⁸ <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02459-w>, 10 september 2021.
- ²⁹ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_55928/strategies-and-considerations-for-the-back-end-of-the-fuel-cycle, 24 februari 2021.
- ³⁰ https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/oregonpsrorg/pages/21/attachments/original/1600287829/EyesWideShut_Report_Final-30August2020.pdf.
- ³¹ <https://ieefa.org/resources/eye-popping-new-cost-estimates-released-nuscale-small-modular-reactor>.
- ³² <https://seekingalpha.com/article/4569771-nuscale-smr-technology-costs-problematic>.
- ³³ <https://www.nuscalepower.com/en/projects>,
- ³⁴ <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Idaho-SMR-project-terminated>, 9 november 2023.
- ³⁵ <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/uamps-and-nuscale-power-agree-to-terminate-the-carbon-free-power-project>, 8 november 2023.
- ³⁶ <https://www.rolls-royce.com/innovation/small-modular-reactors.aspx#/>
- ³⁷ www.no2nuclearpower.org.uk/wp/wp-content/uploads/2021/11/nuClearNewsNo135.pdf, 11 november 2021.
- ³⁸ <https://www.newscientist.com/article/2299113-fix-the-planet-newsletter-can-small-nuclear-power-go-big/>, 25 november 2021.
- ³⁹ <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Constellation-to-help-Dutch-Rolls-Royce-SMR-deploy>, 15 september 2022.
- ⁴⁰ <https://www.gov.uk/government/publications/british-energy-security-strategy>, 7 april 2022.
- ⁴¹ <https://www.neimagazine.com/news/newsrolls-royce-smr-faces-financial-problems-10648145>, 3 maart 2023.
- ⁴² <https://www.parliament.uk/business/committees/committees-a-z/lords-select/science-and-technology-committee/news-parliament-2015/nuclear-research-technology-report-published>, februari 2017.
- ⁴³ <https://www.rolls-royce-smr.com/press/rolls-royce-smr-shortlists-locations-for-first-factory>, 4 juli 2022.
- ⁴⁴ <https://www.telegraph.co.uk/business/2023/02/24/rolls-royce-freezes-hiring-mini-nukes-team/>, 24 februari 2023.
- ⁴⁵ <https://nos.nl/nieuwsuur/artikel/2447301-toch-kernenergie-in-nederland-met-kleinere-centrales>, 6 oktober 2022.
- ⁴⁶ <https://www.baminfra.nl/nieuws/2023/11/bam-infra-nederland-ult-energy-en-rolls-royce-smr-gaan-samenwerken-aan-het>, 8 november 2023.
- ⁴⁷ <https://fd.nl/bedrijfsleven/1495657/bam-studeert-met-rolls-royce-op-kleine-kernreactoren-in-nederland>, 8 november 2023.
- ⁴⁸ [https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-\(002\).pdf](https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-(002).pdf), augustus 2023, pagina 63.
- ⁴⁹ <https://world-nuclear-news.org/Articles/BWRX-300-selected-for-Estonia-s-first-nuclear-powe>, 8 februari 2023.
- ⁵⁰ <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/BWXT-to-manufacture-BWRX-300-reactor-vessel>, 22 maart 2023.
- ⁵¹ <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>
- ⁵² https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf.
- ⁵³ <https://www.opg.com/news/neighbours-pickering-darlington-winter-2024/>, 5 februari 2024.
- ⁵⁴ [https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-\(002\).pdf](https://nuclear.gepower.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/en/bwrx-300/005N9751-RevE-BWRX-300-General-Description-(002).pdf), augustus 2023, pagina 33 en 57.
- ⁵⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=PGnDAXgcIL4>, 3 november 2023.
- ⁵⁶ <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx>.
- ⁵⁷ <https://www.oeko.de/publikation/sicherheitstechnische-analyse-und-risikobewertung-einer-anwendung-von-smr-konzepten-small-modular-reactors>, 10 maart 2021.
- ⁵⁸ <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Six-SMR-power-plants-approved-in-Poland>, 8 december 2023.
- ⁵⁹ De locaties zijn: Ostrołęka, Włocławek, Stawy Monowskie, Dąbrowa Górnicza, Kraków-Nowa Huta, the Tarnobrzeg – Stalowa Wola Special Economic Zone and Warsaw.
- ⁶⁰ <https://osge.com/en/first-potential-sites-announced/>, 17 april 2023.

-
- ⁶¹ E-mail Mariusz Ilnicki aan Herman Damveld op 12 december 2023 om 16:38.
- ⁶² <http://www.kernenergiein nederland.nl/files/19970326-gkn.pdf>, 26 maart 1997.
- ⁶³ <http://www.kernenergiein nederland.nl/node/701>
- ⁶⁴ A, J. van Loon, Dodewaard Doorgelicht, Deventer, 1982, p 10.
- ⁶⁵ Idem, p 11.
- ⁶⁶ Idem, p 13 en 14.
- ⁶⁷ Idem, p 11.
- ⁶⁸ www.kernenergiein nederland.nl/files/19970326-gkn.pdf, 26 maart 1997
- ⁶⁹ <https://www.raadvanstate.nl/uitspraken/@127361/201906056-1-r4/>, 3 november 2021.
- ⁷⁰ <https://www.gelderlander.nl/overbetuwe/energiebedrijven-moeten-miljoenen-extra-opzij-zetten-voor-ontmantelen-kerncentrale-dodewaard~a4db329a/>, 3 november 2021.
- ⁷¹ <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-5d04dce22a68d0d26d99391e792e90ea611690fe/pdf>, 16 mei 2023.
- ⁷² https://www.diw.de/de/diw_01.c.867801.de/neue_kernkraftprojekte_technisch_risikant_und_unrentabel.html, 7 maart 2023.
- ⁷³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223015980?s=09>, 27 juni 2023.
- ⁷⁴ <https://milieu.vvm.info/milieu-2023-3-kernenergie/>, juli 2023, nr. 3.
- ⁷⁵ <https://wisenederland.nl/wp-content/uploads/2023/05/SmallModularReactors2023-Marktanalyse-2.pdf>, mei 2023.
- ⁷⁶ <https://www.world-nuclear-news.org/articles/ge-hitachi-holtec-rolls-royce-smr-and-westinghouse-enter-uk-smr-negotiations>, 26 september 2024.
- ⁷⁷ <https://www.oeko.de/publikation/sicherheitstechnische-analyse-und-risikobewertung-einer-anwendung-von-smr-konzepten-small-modular-reactors>, pagina 198, 10 maart 2021.
- ⁷⁸ <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>
- ⁷⁹ https://fuelcycleoptions.inl.gov/SiteAssets/SitePages/Home/SMR_Waste_Attributes_Report_Final.pdf, 18 november 2022.
- ⁸⁰ <https://www.base.bund.de/DE/themen/fa/veranstaltungen/iaeo-neuartige-reaktortypen/iaeo-reaktoren.html>, 11 januari 2024.
- ⁸¹ <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26500/merits-and-viability-of-different-nuclear-fuel-cycles-and-technology-options-and-the-waste-aspects-of-advanced-nuclear-reactors>, pagina 1, 2023.
- ⁸² <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26500/merits-and-viability-of-different-nuclear-fuel-cycles-and-technology-options-and-the-waste-aspects-of-advanced-nuclear-reactors>, pagina 5, 2023.
- ⁸³ <https://www.gov.uk/government/publications/development-of-small-modular-reactors-smrs-and-advanced-modular-reactors-amrs-corwm-position-paper>, 9 februari 2024.
- ⁸⁴ <https://www.nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/reports-and-briefs/NEI-White-Paper-Establishing-a-High-Assay-Low-Enriched-Uranium-Infrastructure-for-Advanced-Reactors-Jan-2022.pdf>, januari 2022.
- ⁸⁵ <https://www.iaea.org/bulletin/fuelling-the-future>, september 2023.
- ⁸⁶ <https://www.iaea.org/bulletin/fuelling-the-future>, september 2023.
- ⁸⁷ <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26500/merits-and-viability-of-different-nuclear-fuel-cycles-and-technology-options-and-the-waste-aspects-of-advanced-nuclear-reactors>, 2023.
- ⁸⁸ <https://iai.tv/articles/the-end-of-oppenheimers-energy-dream-auid-2549>, 21 juli 2023.