

provinsje fryslân
provincie fryslân 

Kernenergie

Kennisdossier Kernenergie Provincie Fryslân

November 2023



Project in opdracht van SAMEEN, voor Provincie Fryslân

Kernenergie

Kennisdossier Kernenergie Provincie Fryslân

Geschreven door | Brechje Smits

06-01-2023 | Groningen



Inhoud

1 Inleiding	4	6 Tijdspad en Kosten voor het Werken met Kernenergie	10
2 Kernenergie Binnen de Energietransitie	4	6.1 Tijdspad voor het werken met kernenergie	10
3 Nederland en Kernenergie	4	6.2 Geschatte kosten	10
3.1 Kerncentrale Borssele in Nederland	5	7 Afvalverwerking van Kernenergie	11
3.2 De doelen van het rijk	5	7.1 Huidige afvalverwerking	11
3.3 Kamerbrieven Kernenergie	5	7.2 Risico's en ethische aspecten	12
4 Kernenergie in het Buitenland	6	7.3 Innovatie binnen afvalverwerking	12
4.1 Duitsland	6	8 Locatiekeuze Kerncentrale	13
4.2 Frankrijk	6	9 De Belangrijkste Voor- en Nadelen van Kernenergie	13
4.3 België	6	10 Referenties	15
4.4 De doelen van de EU	7		
5 Verschillende Vormen van Kernenergie	7		
5.1 Generatie 3 reactoren	7		
5.2 Generatie 4 reactoren	7		
5.3 Kleine modulaire reactoren	9		
5.4 Thorium als kweekstof	9		



1 | Inleiding

In de afgelopen decennia heeft kernenergie een belangrijke rol gespeeld in het opwekken van elektriciteit in veel landen over de hele wereld. Kernreactoren kunnen een hoog rendement behalen, wat betekent dat ze relatief weinig brandstof nodig hebben om een grote hoeveelheid elektriciteit op te wekken. Bovendien produceren kernreactoren geen directe uitstoot van broeikasgassen, wat maakt dat kernenergie een aantrekkelijke optie is voor het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen en het aanpakken van klimaatverandering.

Ondanks deze voordelen heeft kernenergie ook zijn uitdagingen. Kernreactoren kunnen gevaarlijk zijn in het geval van ongelukken, zoals we hebben gezien in gebeurtenissen zoals Fukushima en Tsjernobyl. Bovendien kan het duur zijn om kernreactoren te bouwen en te onderhouden, en er zijn ook vragen over hoe afval van kernreactoren op een veilige manier kan worden beheerd.

Om deze redenen is het belangrijk om te blijven onderzoeken hoe kernenergie verbeterd en geoptimaliseerd kan worden. Dit literatuuronderzoek zal zich richten op het verzamelen van bestaande kennis en inzichten over kernenergie, met als doel om een beter begrip te verkrijgen van de voordelen en uitdagingen van deze technologie.

Het kennisdossier zal beginnen met het inleiden van kernenergie en wat zijn rol is binnen de energie transitie. In [hoofdstuk 3](#) zal een actuele stand van zaken gegeven worden met betrekking tot kernenergie in Nederland, waarna in [hoofdstuk 4](#) de belangrijkste omringende landen en de doelen van de Europese Unie zullen worden bekeken. Er zijn verschillende vormen van kernenergie en die zullen worden besproken in [hoofdstuk 5](#). Vervolgens creëert [hoofdstuk 6](#) een overzicht van het tijdspad en de kosten voor het werken met kernenergie. Daarna zal [hoofdstuk 7](#) in gaan op de afvalverwerking en de aspecten die daarbij komen kijken. De keuze voor een mogelijke locatie voor een nieuwe reactor is een complex vraagstuk, waarvan een kort overzicht gegeven zal worden in [hoofdstuk 8](#). Als laatste zullen de belangrijkste voor- en nadelen van kernenergie besproken worden in [hoofdstuk 9](#).

2 | Kernenergie Binnen de Energietransitie

Wereldwijd hebben we te maken met een energiecrisis. Het verminderen van de afhankelijkheid van geïmporteerde fossiele brandstoffen is een hoge prioriteit geworden. De invasie van Rusland in Oekraïne en de daardoor verstoorde aanlevering van energie, heeft ervoor gezorgd dat veel landen hun energiestrategie heroverwegen. Door deze crisis is er een grotere focus op het ontwikkelen en in gebruik nemen van diverse en binnenlandse geproduceerde vormen van energie. Hier kan nucleaire energie een grote rol in gaan spelen.

Niet alleen de recente energiecrisis, maar ook de klimaatcrisis is een drijfveer achter de grotere interesse in kernenergie. Meer dan 70 landen hebben zich aangesloten bij het plan om netto nul uitstoot te hebben in 2050. Binnen deze plannen zal de uitstoot eerst 40% moeten verminderen van 2020 tot 2030 waarna het verder zal zakken om een netto uitstoot van nul te bewerkstelligen in 2050. Nucleaire energie kan in het behalen van deze doelen een grote rol gaan spelen doordat het een CO2 arme regelbare vorm is van energie opwekken (International Energy Agency, 2022).

3 | Nederland en Kernenergie

Kernenergie wordt beschouwd als een van de meest efficiënte en schone manieren om elektriciteit op te wekken, omdat het geen uitlaatgassen produceert en ook geen CO2-uitstoot heeft. Het is echter ook een omstreden vorm van energie vanwege de risico's die gepaard gaan met nucleaire reactoren, zoals de kans op ongevallen en het gevaar van radioactief afval. Op dit moment is er een kerncentrale actief in Nederland, kerncentrale Borssele. Borssele is gelegen in Zeeland en is sinds 1973 in gebruik genomen.

3.1 Kerncentrale Borssele in Nederland

Kerncentrale bij Borssele levert elk jaar ongeveer 485 MWe (megawatt energie), wat genoeg is om stroom te leveren aan ruim 1 miljoen huishoudens. Dat is goed voor ongeveer 4% van de gebruikte elektriciteit in Nederland.

Deze kerncentrale zet warmte, opgewekt door het splijtingsproces, om in elektriciteit. Dit proces vindt plaats achter staal en beton zodat het veilig afgeschermd is. Binnen in de centrale bevindt zich de kern, die produceert warmte. Deze warmte ontstaat door het splijten van uraniumkernen, ook wel de splijtstof. Water neemt de warmte die ontstaat op en circuleert onder hoge druk door het reactorvat. Het hete water produceert stoom in een stoomgenerator, dat vervolgens een turbine aandrijft. Deze stoomturbine creëert stroom wat via het elektriciteitsnet geleverd wordt aan bijvoorbeeld huishouden. Zo levert de Kerncentrale van Borssele elektriciteit en restwarmte in de vorm van stoom. In Nederland wordt koud oppervlaktewater uit de Westerschelde gebruikt om het stoom te koelen totdat er weer water ontstaat (Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming, 2014).

3.2 De doelen van het rijk

Minister Jetten, de minister van klimaat en energie, heeft in juli 2022 door middel van een kamerbrief geïnformeerd over de acties die zijn ingezet om uitvoering te geven aan het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie. In het coalitieakkoord staat de aankondiging dat Kerncentrale Borssele langer openblijft en dat het kabinet daarnaast de benodigde stappen gaat nemen ter voorbereiding voor de bouw van twee nieuwe kerncentrales.

In de brief worden meerdere beweegredenen genoemd. Hier haalt minister Jetten aan dat er een omschakeling moet plaatsvinden op het gebied van ons energiegebruik en de voorziening hiervan. Hier wordt bedoeld op CO₂-arme opties, zoals wind, of zonne-energie. Echter is deze energie niet regelbaar, als de zon niet schijnt of de wind niet waait kan er geen energie opgewekt worden. Daardoor is er nood voor een CO₂ arme optie voor regelbare energie, zoals kernenergie. De opwekking van kernenergie vindt op enkele locaties plaats, waardoor er een voordeel is in het indirecte ruimtebeslag in verband met uitzicht en geluid. Met het oog op de verbintenis die Nederland aan is gegaan met het doel om in 2050 klimaatneutraal te zijn, kan

kernenergie in de energiemix een aanvulling zijn op zon, wind en geothermie en kan het worden ingezet voor de productie van waterstof. Dit zal Nederland minder afhankelijk maken van gas. Echter duurt het ongeveer tien jaar om een kerncentrale te bouwen, waardoor er pas na 2030 een bijdrage geleverd kan worden aan de klimaatdoelstellingen richting 2050. Daarnaast is de besluitvorming rondom kernenergie veelomvattend. Verder kost het proces om kerncentrales te bouwen veel en is het complex en is de besluitvorming rondom kernenergie veelomvattend.

Een belangrijk onderdeel om uit te zoeken of Nederland er goed aan zou doen kerncentrales te bouwen, is het uitvoeren van een studie over de inpassing van kernenergie in Nederland. Met de uitkomsten van deze studie zal er een beter beeld zijn van de inzet van kernenergie. Verder is het versterken van de kennisinfrastructuur binnen Nederland van belang om in te kunnen spelen op ontwikkelingen. Binnen het coalitieakkoord staat veiligheid voorop, dit is een essentiële voorwaarde bij het ontwikkelen van de plannen. In het najaar van 2023 streeft Minister Jetten een definitief besluit te hebben door de beide Kamers over financiering, rol en kosten van de overheid en vergunningsproces van nieuwe centrales. (R. Jetten, Kamerbrief, juli 1, 2022)

3.3 Kamerbrieven Kernenergie

De volgende kamerbrieven van het afgelopen jaar (2022) geven belangrijke informatie over de doelen van Nederland met betrekking tot kernenergie. De linkjes staan op niet chronologisch volgorde.

- [Hoofdlijnen Programma Energiehoofdstructuur](#)
- [Nucleaire veiligheid bij de inzet nieuwe kernenergie](#)
- [Nadere uitwerking van de afspraken uit het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie](#)
- [Versterking nucleaire kennis- en innovatiestructuur](#)
- [Verantwoord omgaan met veiligheid en gezondheid in de energietransitie](#)
- [Studies over kernenergie](#)
- [Verslag Energieraad 27 juni 2022 in Luxemburg](#)
- [Informatie over acties die zijn ingezet om uitvoering te geven aan het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie](#)
- [Contouren Nationaal plan energiesysteem](#)

4 | Kernenergie in het Buitenland

Meer dan 70 landen in de wereld, die samen driekwart van de energie gerelateerde broeikasgassen uitstoten, hebben afgesproken om hun uitstoot te verlagen naar netto nul. Om dit te halen hebben steeds meer landen interesse in nucleaire energie. Het Verenigde Koninkrijk, Frankrijk, China, Polen en India hebben aangekondigd dat nucleaire energie een grote rol zal spelen in hun energiestrategie. Ook Amerika investeert in geavanceerde reactor types. België en Korea hebben onlangs plannen terugschroefd om bestaande kerncentrales uit te faseren. In de plannen van het Verenigde Koninkrijk staan plannen om acht nieuwe grote reactoren te bouwen. Een grote omslag in de plannen rondom kernenergie is veroorzaakt door de huidige wereldwijde energiecrisis.

4.1 Duitsland

In 2020 was kernenergie verantwoordelijk voor ongeveer 11% van het totale elektriciteitsverbruik in Duitsland. Kernenergie wordt op dit moment opgewekt in drie actieve kernreactoren in Duitsland, met een totaal vermogen van ongeveer 4055 MWe. De Duitse regering heeft besloten om te werken aan een afbouw van kernenergie in Duitsland. Dit besluit is genomen naar aanleiding van de nucleaire ongelukken in Tsjernobyl (1986) en Fukushima (2011). In 1998 begon het plan van de Duitse overheid om nucleaire energie af te bouwen. In 2009, met de komst van een nieuwe regering, werden deze plannen stopgezet tot 2011, waarna ze weer in gang werden gezet. Acht kernreactoren werden meteen gesloten en de rest van de reactoren zouden aan het eind van 2022 moeten sluiten. Toch heeft Duitsland ervoor gekozen om de drie reactoren die nog in werking zijn te blijven gebruiken tot midden april 2023 door de gereduceerde levering van gas vanuit Rusland (World Nuclear Association, 2019b).

4.2 Frankrijk

In Frankrijk is kernenergie een belangrijke bron van elektriciteit. In 2020 was kernenergie verantwoordelijk voor ongeveer 70% van het totale elektriciteitsverbruik in Frankrijk.

Kernenergie wordt op dit moment opgewekt in 56 actieve kernreactoren in Frankrijk, met een totaal vermogen van ongeveer 61.370 MWe.

Hoewel kernenergie een belangrijke rol speelt in de Franse energievoorziening, heeft de Franse regering in 2014 plannen gemaakt om te werken aan een afbouw van kernenergie in Frankrijk. Om de afbouw van kernenergie te realiseren, heeft de Franse regering een aantal maatregelen genomen, zoals het instellen van een datum waarop het aandeel van kernenergie in het totale elektriciteitsverbruik in Frankrijk moet zijn afgenomen tot 50% (2035) en het instellen van een programma voor het opkopen van aandelen in kernenergiebedrijven door de staat.

Echter heeft Frankrijk in februari 2022 aangekondigd haar plannen te hebben gewijzigd en willen zes nieuwe reactoren bouwen en overwegen er nog 8 extra te maken (World Nuclear Association, 2019a).

4.3 België

In 2020 was kernenergie verantwoordelijk voor ongeveer 50% van het totale elektriciteitsverbruik in België. Kernenergie wordt op dit moment opgewekt in zes actieve kernreactoren in België.

Hoewel kernenergie een belangrijke rol speelt in de Belgische energievoorziening, heeft de Belgische regering wel plannen om te werken aan een afbouw van kernenergie in België. Om de afbouw van kernenergie te realiseren, heeft de Belgische regering een aantal maatregelen genomen, zoals het instellen van een datum waarop de laatste kernreactor in België moet sluiten (2025) en het instellen van een programma voor het opkopen van aandelen in kernenergiebedrijven door de staat.

Echter heeft ook België in 2022 haar plannen gewijzigd. In maart 2022 zijn de plannen om de kernreactoren in België te laten sluiten vertraagd met 10 jaar. Twee van de nieuwste reactoren in België, Doel 3 en Tihange 3, zullen operatief blijven tot 2035 (World Nuclear Association, 2018).

4.4 De doelen van de EU

De Europese Unie heeft een aantal doelen opgesteld voor het gebruik van kernenergie. Eén van de belangrijkste doelen is om te werken aan de vermindering van de afhankelijkheid van de EU van aardgas en andere niet-hernieuwbare energiebronnen, en om tegelijkertijd de uitstoot van broeikasgassen te verminderen.

Om deze doelen te bereiken, heeft de EU een aantal maatregelen genomen, zoals het ondersteunen van onderzoek en ontwikkeling op het gebied van kernenergie en het bevorderen van investeringen in kernenergie projecten. De EU heeft ook werk gemaakt van de ontwikkeling van veiligheids- en kwaliteitsnormen voor kernreactoren, om te zorgen dat kernenergie op een veilige en verantwoorde manier wordt gebruikt (European Nuclear Energy Forum, 2019).

5 | Verschillende Vormen van Kernenergie

Er zijn verschillende generaties kernreactoren die bestaan uit verschillende vormen van productie van kernenergie. Generatie 1 reactoren zijn de prototypes uit de jaren '50 en '60 van de vorige eeuw. Generatie 2 reactoren zijn vercommercialiseerde reactoren (vrijwel allemaal gekoeld met water), die in de jaren '70 en '80 gebouwd zijn, waaronder de kerncentrale in Borssele. Generatie 3 reactoren zijn doorontwikkelde tweede generatie reactoren. Dit zijn de centrales die nu wereldwijd in aanbouw zijn. Generatie 4 reactoren zijn reactoren die op het gebied van duurzaamheid (o.m. zuiniger omgaan met natuurlijke grondstoffen), economie, veiligheid, en/of non-proliferatie significante vooruitgang moeten laten zien ten aanzien van derde generatie reactoren.

5.1 Generatie 3 reactoren

Generatie 3 kernreactoren zijn de nieuwste generatie kernreactoren die zijn ontworpen om efficiënter en veiliger te zijn dan de eerdere generaties. Ook kunnen ze langer in gebruik blijven. Ze zijn ontworpen om een breed scala aan toepassingen te kunnen dienen, waaronder elektriciteitsproductie, proceswarmte en het produceren van waterstof (Smith, 2020).

Er zijn verschillende soorten generatie 3 reactoren, waaronder lichtwaterreactoren, zware waterreactoren en gasgekoelde reactoren (Jones, 2019). Lichtwaterreactoren zijn de meest voorkomende soort kernreactor en maken gebruik van licht water als koelmiddel en neutronenmoderator. Zware waterreactoren maken gebruik van zwaar water als koelmiddel en neutronenmoderator en zijn doorgaans efficiënter dan lichtwaterreactoren. Gasgekoelde reactoren maken gebruik van gas, zoals koolstofdioxide of helium, als koelmiddel en zijn over het algemeen kleiner en flexibeler dan andere soorten reactoren.

Generatie 3 reactoren zijn over het algemeen kleiner en flexibeler dan de eerdere generaties reactoren, wat ze geschikt maakt voor gebruik in kleinere elektriciteitscentrales en andere industriële toepassingen (Williams, 2018). Dit maakt ze aantrekkelijk voor landen met kleinere elektriciteitsbehoeften of voor gebruik in afgelegen gebieden waar het moeilijk is om grotere elektriciteitscentrales te bouwen en te onderhouden.

Een belangrijk doel van generatie 3 kernreactoren is om de veiligheid te verhogen ten opzichte van eerdere generaties reactoren. Dit is bereikt door onder andere het gebruik van passieve veiligheidssystemen, die geen externe stroomvoorziening nodig hebben en automatisch in werking treden in noodsituaties (International Atomic Energy Agency, 2020). Generatie 3 reactoren zijn ook ontworpen om te voldoen aan strengere regelgeving voor het beheersen van radioactief afval en om de kans op kernongevallen te verminderen.

5.2 Generatie 4 reactoren

Generatie 4 kernreactoren zijn de volgende generatie kernreactoren die momenteel in ontwikkeling zijn. Ze zijn ontworpen om nog efficiënter en veiliger te zijn dan de huidige generatie 3 reactoren en om te voldoen aan de toenemende vraag naar schone en betrouwbare energiebronnen. De reactoren zijn nog veiliger dan vorige generaties. Ze zijn ook ontworpen om te voldoen aan strengere regelgeving voor het beheersen van radioactief afval en om de kans op kernongevallen te verminderen. Eén van de belangrijkste doelen van generatie 4 reactoren is om de productie van elektriciteit te verhogen terwijl tegelijkertijd de hoeveelheid radioactief vermindert.

Er zijn verschillende soorten generatie 4 reactoren die worden ontwikkeld. Het Generation IV International Forum (GIF) is een samenwerkingsverband van regeringen en onderzoeksinstellingen dat zich bezighoudt met de ontwikkeling van generatie 4 kernreactoren. In 2002 heeft het GIF zes concepten voor generatie 4 kernreactoren geïdentificeerd die verder onderzocht moeten worden. Deze concepten zijn (World Nuclear Association, 2020):

1. **Supercritical Water Reactor (SCWR):** Een kernreactor waarin water gebruikt wordt als koelmiddel bij druk- en temperatuurniveaus boven het kritieke punt van water.
2. **Gas-cooled Fast Reactor (GFR):** Een kernreactor die gebruikmaakt van helium als koelmiddel en kan werken met verschillende soorten brandstoffen.
3. **Lead-cooled Fast Reactor (LFR):** Een kernreactor die gebruikmaakt van lood als koelmiddel en kan werken met verschillende soorten brandstoffen.
4. **Sodium-cooled Fast Reactor (SFR):** Een kernreactor die gebruikmaakt van natrium als koelmiddel en kan werken met verschillende soorten brandstoffen.
5. **Molten Salt Reactor (MSR):** Een kernreactor die gebruikmaakt van vloeibare zouten als koelmiddel.
6. **Very High Temperature Reactor (VHTR):** Een grafiet-gemodereerde kernreactor die gebruikmaakt van helium als koelmiddel en kan werken met verschillende soorten brandstoffen.

Het is belangrijk op te merken dat Generatie 4 kernreactoren momenteel nog in ontwikkeling zijn en dat het nog enkele jaren zal duren voordat ze operationeel zullen zijn. Bij de ontwikkeling van Generatie 4 kerncentrales is sprake van verbetering van de nucleaire technologie ten opzichte van de eerdere generaties. Er zijn echter ook een aantal uitdagingen die per nieuw concept verschilt (Scheepers et al., 2021). In Europa is in 2007 het Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) opgericht met de publicatie van een gezamenlijk gedragen visiedocument. In dit visiedocument wordt bij Generatie 4 reactoren onderscheid gemaakt tussen reactoren die met name gericht zijn op verbetering van de duurzaamheid van kernenergie en reactoren die met name gericht zijn op gecombineerde warme- kracht toepassing (SNETP, 2007).

5.2.1 De belangrijkste voor- en nadelen van generatie 4 kernreactoren

Generatie 4 kernreactoren zijn efficiënter. In het geval van de LFR en SFR reactoren kunnen ze met uranium en gebruikte radioactieve splijtstof 20x zoveel energie halen uit dezelfde hoeveelheid uranium als andere reactoren. Dit zal ervoor zorgen dat we veel langer kunnen doen met de huidige uraniumvoorraad op aarde. Daarbij produceren generatie 4 kernreactoren minder radioactief afval.

In combinatie met thorium produceren generatie 4 reactoren minder afval. Thorium zou ook in huidige generatie 2 en 3 watergekoelde reactoren gebruikt kunnen worden, echter is het gebruik van thorium het meest efficiënt wanneer dit toegepast wordt in generatie 4 reactoren.

De HTR, LFR en SFR reactoren kunnen na een termijn ook een combinatie van elektriciteit en stoom gaan leveren. Bij de HTR is de stoomtemperatuur het hoogst, dus hierbij zal dit het beste gaan. Maar ook met de lagere stoomtemperaturen van de LFR en SFR zal dit mogelijk zijn.

Echter, doordat generatie 4 reactoren nog niet veel zijn gebouwd is er een gebrek aan ervaring met zowel de bouw als bedrijf van de reactoren, ze bevatten vaak 'kinderziekten'. Deze openbaren zich in de eerste jaren van het bedrijf en dit zorgt voor economische risico's.

Tijdens de ontwikkeling van nieuwe typen reactoren is de focus niet alleen op de ontwikkeling van de reactor maar ook op de ontwikkeling van andere fabricagemethoden en methoden om gebruikte splijtstof te verwerken. De splijtstof van generatie 4 reactoren heeft een andere vorm, waardoor dus ook de afvalverwerking en opslag hiervan onderzocht moet worden (Scheepers et al., 2021).

Een opsomming van de belangrijkste voor- en nadelen zijn de volgende:

Voordelen

- **Hogere efficiëntie:** Generatie 4 kernreactoren zijn ontworpen om efficiënter te zijn dan huidige kernreactoren, wat betekent dat ze minder brandstof nodig hebben om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken. Dit kan leiden tot lagere kosten voor energieproductie.
- **Lager radioactief afval:** Sommige Generatie 4 kernreactoren zijn ontworpen om radioactief afval te verminderen door het te transmuteren in minder radioactief materiaal.
- **Lagere kans op ongelukken:** Generatie 4 kernreactoren zijn ontworpen om veiliger te zijn dan huidige kernreactoren. Dit kan leiden tot een lagere kans op ongelukken en een lagere impact op het milieu in het geval van een ongeluk.

Nadelen

- **Hogere kosten:** Het ontwikkelen en bouwen van Generatie 4 kernreactoren kan duurder zijn dan huidige kernreactoren, wat kan leiden tot hogere kosten voor energieproductie.
- **Ontbreken van bewezen technologie:** Generatie 4 kernreactoren zijn nog in ontwikkeling en sommige concepten zijn nog niet bewezen op commerciële schaal. Dit kan leiden tot onzekerheid over de haalbaarheid van deze reactoren.

5.3 Kleine modulaire reactoren

Kleine modulaire reactoren, in het Engels Small Modular Reactors (SMRs), zijn nieuwe innovaties ontworpen om tot 300 MW aan elektriciteit te genereren. De componenten van de reactor worden gemaakt in fabrieken en vervolgens via transport als module op de juiste locatie gebracht. Door de manier waarop ze in de fabriek gemaakt worden kunnen ze makkelijker in elkaar gezet worden. De meeste componenten kunnen dus seriematig in een fabriek gemaakt worden en het ontwerp kan eenvoudiger zijn. Er zijn verschillende soorten SMRs die allemaal klein zijn in omvang, maar nog in verschillende delen van onderzoek zitten. Net zoals dat er verschillende categorieën grote reactoren zijn is dat ook het geval voor SMR.

De interesse in SMRs neemt toe door de unieke karakteristieken van de reactor zoals de grootte en modulariteit maar ook door verschillende toepassingen zoals elektriciteit, warmte, waterstofproductie en het ontzilten van zeewater. De grootte van de reactor kan gezien worden als een positief en een negatief aspect. Voornamelijk de modulariteit van de reactor is één van de positieve punten. De modulariteit maakt het fabriceren, transporteren en installeren van de reactor sneller en gemakkelijker. Dit zorgt voor een beter gecontroleerde omgeving, standaardisatie en simplificatie van het ontwerp en voor een kortere constructie tijd. Meerdere kleinere reactoren kunnen ook samen gebruikt worden op één locatie om gebruik te maken van bijvoorbeeld een snellere leercurve en beter aanpassingsvermogen doordat er vaker een reactor wordt opgezet en in gebruik is (Mignacca & Locatelli, 2020).

Ze hebben minder koelwater nodig en zijn dus ook niet gebonden aan plaatsing aan de kust. Het bouwen van een kerncentrale kost nu nog vele jaren en miljarden euro's per centrale. Het idee achter de SMR is dat ze als een serieproductie van de band kunnen rollen en daarmee goedkoper

zijn. Rolls-Royce stelt dat de bouwtijd vijf tot zeven jaar is. Het eerste exemplaar kost 2,5 miljard euro, maar daarna moeten de kosten zijn teruggelopen tot 2 miljard per centrale (de Blauw, 2022).

Verder zorgen deze SMRs voor lagere kapitaalkosten, inherente veiligheid, betere afval management en lagere project risico's. Deze eigenschappen kunnen ervoor zorgen dat nucleaire energie een hogere sociale acceptatie krijgt en daardoor interessanter is voor privé investeringen in onderzoek naar de ontwikkelingen ervan. SMRs kunnen ook makkelijk gebouwd worden op oude fossiele brandstof fabrieken die niet meer worden gebruikt waardoor er gebruikgemaakt kan worden van al bestaande transmissie en koelwater (International Energy Agency, 2022).

Deze kleine reactoren hebben veel politieke en institutionele steun doordat in Amerika bijvoorbeeld grote subsidies verleend worden maar ook in Canada, het Verenigde en Frankrijk is er meer interesse. (International Energy Agency, 2022).

5.4 Thorium als kweekstof

Bij huidige reactoren wordt uranium gebruikt om energie op te wekken. Uitgaande van het huidige verbruik zijn de uraniumvoorraden op dit moment voldoende voor ongeveer 130 jaar. De verwachting is wel dat, wanneer de uranium vraag zal toenemen, meer uranium gevonden zal worden zoals het winnen van uranium uit zeewater. Echter is een andere optie, het gebruiken van thorium als kweekstof. Het heeft enkele potentiële voordelen ten opzichte van kern-splijtstoffen die momenteel worden gebruikt, zoals uranium en plutonium.

Eén van de voordelen van thorium als brandstof is dat het minder radioactief afval produceert. Thorium kan niet spontaan splijten. Bovendien kan thorium gemakkelijk worden opgebrand, wat betekent dat er minder radioactief afval overblijft. Een ander voordeel van thorium is dat het meer energie opwekt per gram dan uranium. Dit betekent dat er minder brandstof nodig is om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken. Thorium is ook makkelijker te verkrijgen dan uranium, omdat het vrijwel overal op aarde voorkomt.

Er zijn echter ook beperkingen verbonden aan het gebruik van thorium als brandstof. Thorium kan niet direct worden gebruikt als brandstof in een kernreactor; het moet eerst worden omgezet in een bruikbaar isotoop, zoals uranium-233. Dit omzetten gebeurt na absorptie van een neutron door middel van kweekreactoren. Door kweekreactoren zal kernenergie vele

duizenden jaren in het elektriciteitsverbruik kunnen voorzien. Dit betekent dat de uranium bevoorrading geen groot probleem zal zijn. Dit proces is echter technisch uitdagend en kostbaar. Bovendien zijn er nog maar weinig kernreactoren die thorium gebruiken als brandstof, dus er is nog weinig ervaring met het gebruik ervan op commerciële schaal.

Thorium kan in verschillende soorten kernreactoren worden gebruikt. Eén van de meest bekende soorten kernreactoren die thorium gebruiken is de zogenaamde thorium-geïnduceerde spleetreactor (Th-MSR). Deze reactoren gebruiken thorium als brandstof en vloeibare fluoridezouten als koelmiddel. Een andere soort kernreactor die thorium gebruikt is de licht waterreactor met thorium (LWR-Th). Deze reactoren gebruiken thorium als brandstof en water als koelmiddel. Beide reactoren zijn ontworpen om efficiënter te zijn dan conventionele licht waterreactoren en minder radioactief afval te produceren.

Er zijn ook andere soorten kernreactoren die thorium gebruiken, zoals de gasgekoelde reactor met thorium (GCR-Th) en de vloeibare zoutreactor met thorium (LSR-Th). Deze reactoren zijn nog in ontwikkeling en het is nog niet duidelijk wanneer ze op commerciële schaal zullen worden gebruikt (World Nuclear Association, 2017).

6 | Tijdsfad en Kosten voor het Werken met Kernenergie

Het tijdsfad en kosten voor het werken met kernenergie kunnen sterk verschillen tussen verschillende generaties kerncentrales, maar ook beïnvloed worden door andere aspecten. Dit zal verder toegelicht worden in dit hoofdstuk.

6.1 Tijdsfad voor het werken met kernenergie

Het tijdsfad en de kosten voor het werken met kernenergie kan verschillen, voornamelijk tussen verschillende generaties kerncentrales. Generatie 1 en 2 kerncentrales worden niet meer

gebouwd. Generatie 3 kerncentrales worden verder ontwikkeld, voornamelijk op gebied van veiligheid. Generatie 4 reactoren zijn reactoren die op het gebied van duurzaamheid, economie, veiligheid, en/of non-proliferatie significante vooruitgang moeten laten zien ten aanzien van derde generatie reactoren (Scheepers et al., 2021).

Naast het bouwen van de reactor kost ook het vergunningstraject veel tijd. Voor generatie 3 kerncentrales geldt het volgende. De totale tijd, inclusief het vergunningstraject en de periode voor bouw van een watergekoelde generatie 3 kerncentrale bedraagt minimaal 11 jaar. Dit is het geval voor een goed beschreven en gedocumenteerd reactor model die meerdere keren gebouwd is onder vergelijkbare condities. Wanneer dit niet het geval is zal het proces jaren langer kunnen duren. Generatie 3 centrales die recent in Europa zijn gebouwd hebben te maken gehad met significante vertragingen in het bouwproces. Dit komt grotendeels doordat het gaat om een eerste versie van een nieuw type kerncentrale.

Momenteel wordt er veel onderzoek gedaan naar generatie 4 kerncentrales en de ontwikkelingen zijn hierdoor nog in volle gang. Dit zorgt ervoor dat het tijdsfad lastig te bepalen is. Met de huidige kennis en inzichten wordt er bij de bouw rekening gehouden met een totale doorlooptijd van 20 tot 25 jaar. Binnen deze periode worden het verkrijgen van de vergunning voor de bouw van de centrale en de daadwerkelijke bouw tot en met de aansluiting op het net meegenomen in de totale tijd. Hierbij is het belangrijk dat voorafgaand aan de vergunningsaanvraag de veiligheid van dit nieuwe reactor type uitgebreid getest moet worden (Scheepers et al., 2021).

6.2 Geschatte kosten

Het inschatten van de kosten voor het bouwen en gebruiken van een reactor kunnen ingewikkeld zijn. Landen die veel kernenergie gebruiken, zoals Amerika en Frankrijk, kunnen moeilijk gebruikt worden als voorbeeld. Dit komt doordat zij één van de eerste gebruikers waren waardoor er rekening gehouden moet worden met de nadelen van de eerste gebruiker. Verder zijn de meeste van hun reactoren meer dan 30 jaar geleden gebouwd, waardoor deze niet als goed voorbeeld gebruikt kunnen worden bij het inschatten van de kosten (Lovering et al., 2016).

Bij het bekijken van de kosten van kernenergie kunnen er vijf componenten geïdentificeerd worden die invloed hebben (Scheepers et al., 2021):

1. De kosten voor constructie, financiering gedurende de bouwtijd en tijdens de exploitatie. De duur van de bouw beïnvloedt de hoogte van deze kostencomponenten.
2. De operationele kosten voor het exploiteren van de kerncentrale, waaronder onderhoudskosten en personeelskosten.
3. De kosten voor de splijtstof.
4. De kosten voor het afvoeren en veilig opbergen van de gebruikte splijtstof. Als sprake is van tijdelijke berging, dan zitten hier ook de reserveringen in voor de definitieve eindberging.
5. Ontmanteling van de kerncentrale: de reserveringen die gemaakt worden tijdens de exploitatie van de kerncentrale voor het veilig afbreken, behandelen en bergen van de reststoffen.

De kosten van kernenergie verschillen per land en per type kernreactor, en zijn afhankelijk van verschillende aspecten zoals schaalgrootte en de rol van de overheid. Voor een nucleaire reactor met een capaciteit van 1600 megawatt zijn de totale constructie kosten ongeveer tussen de €5.7 tot €11.5 miljard (Gamboa Palacios & Jansen, 2018).

De investeringskosten voor kernenergie zijn in Europa de afgelopen jaren gestegen, van 1900-2700 € per kWe (kilowatt elektrisch vermogen) in 2007 tot 3600-7200 € per kWe in 2018. Deze kosten zijn berekend met de waarde van de euro in 2017. De redenen hiervoor zijn met name de extra veiligheidsmaatregelen in de nieuwe generatie 3 kernreactoren en de bouw van niet eerder gemaakte kernreactoren. Andere factoren die een rol hebben gespeeld zijn een toename van materiaalkosten en de noodzaak opnieuw constructie kennis en -vaardigheden op te doen na een lange periode waarin geen kernreactoren zijn gebouwd (van der Zwaan, 2019).

Ook is er een toename aan onzekerheid met betrekking tot de kosten van nucleaire energie tussen 2007 en 2018. Dit is deels door extra veiligheidsmaatregelen en strenge regulaties (Gamboa Palacios & Jansen, 2018). Nu er een recordhoogte inflatie is bereikt zullen de kosten en de onzekerheden die hiermee gepaard gaan waarschijnlijk alleen maar verder oplopen.

7 | Afvalverwerking van Kernenergie

De afvalverwerking van kernenergie kent verschillende risico's en ethische aspecten. In dit hoofdstuk zullen deze risico's en ethische aspecten van de radioactieve afvalverwerking van kernenergie besproken worden.

7.1 Huidige afvalverwerking

Bij het produceren van kernenergie is de hoeveelheid afval in omvang zeer beperkt. Echter is de radioactiviteit en toxiciteit van kernafval erg schadelijk voor mens en milieu. Dit kernafval kan gedurende duizenden jaren radioactief blijven; sommige vormen van het kernafval kunnen zelfs miljoenen jaren actief blijven. De opslag van kernafval is dan ook erg belangrijk. Op dit moment bestaan er twee soorten opslag:

1. Bovengronds - in containers of bunkers
2. In de diepe ondergrond (in geologische lagen)

Op dit moment wordt het Nederlandse laag-, middel-, en hoogradioactief afval verwerkt en voor ongeveer honderd jaar veilig opgeslagen bij de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) te Zeeland. Hierna zal het afval, gebaseerd op de huidige kennis in de wetenschap en techniek, in de diepe ondergrond zijn eind berging plaatsvinden (van der Zwaan, 2019). COVRA is het enige bedrijf in Nederland dat verantwoordelijk is voor de centrale verzameling, verwerking en opslag van radioactief afval. In 1989 is de eerste vergunning voor de locatie van COVRA in Nieuwdorp vrijgegeven en sinds 2002 is de Nederlandse staat volledig eigenaar van COVRA (Stralingsbescherming, 2021).

Het geologisch opslaan van kernafval is wetenschappelijk en technisch intensief onderzocht en laat zien dat de hoeveelheid radiotoxiciteit die uiteindelijk terugkeert in de biosfeer verwaarloosbaar klein is ten opzichte van het natuurlijke stralingsniveau. Echter blijft het radioactief afval zich wel ophopen. Naar verwachting heeft Nederland in 2130 totaal ongeveer 400 m³ hoogradioactief afval. Deze schatting is wel gebaseerd op de aanname dat de kerncentrale van Borssele in 2033 sluit. Mocht er toch een tweede kerncentrale worden gebouwd

in Nederland, dan zal dat er voor zorgen dat er ongeveer 750 m³ aan hoogradioactief afval is. De hoeveelheid hoogradioactief afval in Nederland is qua omvang niet groot, maar neemt 99,9% van de totale hoeveelheid radioactiviteit voor zijn rekening. Radioactieve straling kan wel honderden tot soms vele duizenden jaren gevaarlijk blijven (Scheepers et al., 2021).

7.2 Risico's en ethische aspecten

Het opbergen van radioactief afval in de diepe ondergrond is uitgebreid onderzocht en is internationaal aanvaard als veilige oplossing. Echter is dat op maatschappelijk gebied nog niet het geval. Dit komt omdat de huidige generatie, toekomstige generaties opzadelt met de problematiek van het opbergen van radioactief afval. Op dit moment heeft Nederland in 2016 als vervolg op de Europese richtlijnen vastgesteld dat het radioactief afval pas na ongeveer 150 tot 200 jaar zijn eindbergiging bereikt, wat ervoor zorgt dat toekomstige generaties hiervoor verantwoordelijk zullen zijn (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

De kerncentrale Borssele in Nederland produceert op jaarbasis 1,5 m³ verglaasd afval. Verglaasd afval betekent dat het radioactief kernafval in massief glas ingesloten wordt zodat het mogelijk is het hoogradioactief kernafval op te slaan zonder gevaar voor lekkage en uitspoeling. Niet al het radioactief afval moet worden opgeslagen, een deel hiervan kan worden gerecycled (Stralingsbescherming, 2015).

Diepe geologische berging, de huidige bergingstechniek, brengt voor toekomstige generaties de noodzaak met zich mee van bewaking en instandhouding van kennis en herinnering. Dit is een last die zij waarschijnlijk gedurende een lange periode, mogelijk duizenden jaren, zullen dragen. De financiering van deze opbergiging zal in de 100-jarige periode van bovengrondse opslag bij COVRA door een lange termijn kapitaalsopbouw op basis van tariefinkomsten plaatsvinden.

Het opzadelen van toekomstige generaties met de problematiek met betrekking tot kernafval is niet de enige reden voor maatschappelijke weerstand. De maatschappij acht de veiligheidsberekeningen vanwege de extreem lange opberg periode onbetrouwbaar, maar ook de associatie met de inzet van kernenergie zorgt voor weerstand door eerdere kernrampen. Verder speelt het onvoorspelbare gedrag van de ondergrond, zoals aardbevingen, CO₂-opslag en schaliegaswinning, ook een negatieve rol binnen de maatschappij. Maar ook de kosten die gemaakt moeten worden voor de opslag van kernafval in mijnen beïnvloeden de maatschappij.

7.3 Innovatie binnen afvalverwerking

Door de grote ontwikkelingen, in met name de olie- en gasindustrie, op het gebied van boortechnieken is er in de laatste jaren een alternatief concept ontwikkeld dat internationaal volop in de belangstelling staat. Voor landen met kleinere hoeveelheden hoogradioactief afval, zoals Nederland, is er door deze ontwikkelingen een ander opberg concept binnen bereik dat minder ingrijpend is dan een omvangrijke en dure opberg mijn: diepe boorgaten. In tegenstelling tot mijnen, kunnen diepe boorgaten op een relatief korte termijn van enkele tientallen jaren aangelegd, gevuld en afgesloten worden. Als dit vergeleken wordt met de mijnen die pas over 150 tot 200 jaar afgesloten zullen worden in het huidige plan is dat een groot verschil.

Door deze boortechniek te gebruiken, die aanzienlijk sneller is, wordt het afvalprobleem niet doorgeschoven naar generaties na ons. Dit betekent dat de huidige generatie de verplichting heeft het afvalprobleem op te lossen. In het nationaal programma gecreëerd door Nederland is aangegeven dat de oplossing voor het afvalprobleem geen onredelijke lasten op de schouders van toekomstige generaties mag leggen. Dit is wel het geval als mijnen worden gebruikt, maar dit is aanzienlijk minder bij het gebruik van de nieuwe boortechniek (van de Vate, 2018).

De boorgat techniek is modulair van opzet, geografisch op veel plaatsen realiseerbaar en kan snel uitgevoerd worden. De realisering van het bergen van het afval kan financieel gefaseerd plaatsvinden doordat gaten naar behoefte geboord kunnen worden. De aanlegkosten voor een diep boorgat bedraagt naar schatting ongeveer 50 miljoen euro per geboord gat van 5 km diep met een opberg traject van 2km. Het boorgat is goed voor enkele honderden afvalcontainers met hoogradioactief afval. Een kostenschatting voor de aanleg van een opberg mijn kan enkele tientallen miljarden euro's bedragen (van de Vate, 2018).

8 | Locatiekeuze Kerncentrale

Er zijn een aantal criteria waarmee rekening moet worden gehouden bij het kiezen van de juiste locatie voor een kerncentrale. Hieronder zijn een aantal belangrijke criteria opgesomd:

1. Afstand tot bewoonde gebieden
2. Geologie
3. Toegang tot water
4. Transport
5. Milieu
6. Economische overwegingen

Afstand tot bewoonde gebieden is belangrijk om te voorkomen dat mensen blootgesteld worden aan gevaarlijke straling in geval van een ongeluk. Het is dus van belang dat de kernreactoren op een veilige afstand van bewoonde gebieden worden gebouwd. De grond van de locatie moet beoordeeld worden om te kijken of het stabiel genoeg is om een kernreactor te dragen, daarom is de geologie belangrijk. Aangezien kerncentrales water gebruiken voor koeling en andere doeleinden, moet de locatie voldoende toegang hebben tot waterbronnen. Bij kleine modulaire reactoren, SMRs, is er veel minder koelwater nodig waardoor deze reactoren op verschillende plekken ingezet zouden kunnen worden. Transport naar de locatie moet gemakkelijk gaan, de locatie moet dus goed bereikbaar zijn voor transport van bijvoorbeeld brandstof en andere materialen naar de kerncentrale. Het bouwen van een kerncentrale heeft veel effect op de omgeving en het milieu. De locatie moet daarom worden beoordeeld op eventuele milieueffecten die kunnen optreden als gevolg van de bouw en het gebruik van de kerncentrale. De locatie moet ook worden beoordeeld op economische haalbaarheid, zoals de kosten van bouw en onderhoud van de kerncentrale en de toegang tot elektriciteitsnetwerken. Een ingewikkeld punt met betrekking tot het vinden van een juiste locatie, is het maatschappelijke draagvlak (IAEA, 2021).

9 | De Belangrijkste Voor- en Nadelen van Kernenergie

Kernenergie kan een belangrijke rol spelen in het verminderen van CO₂-uitstoot en het behalen van de klimaatdoelen van 2050. Het is een vorm van energie die regelbaar is, in tegenstelling tot bijvoorbeeld wind- en zonne-energie. Bovendien kan het worden ingezet om meer energie binnen Nederland te produceren, wat kan bijdragen aan een vermindering van de afhankelijkheid van het buitenland. Ten slotte neemt kernenergie, in vergelijking met andere vormen van energie, weinig ruimte in beslag.

Afvalverwerking van radioactief afval is een ingewikkeld proces omdat het afval honderden tot duizenden jaren gevaarlijk kan blijven. Dit betekent dat de gevolgen van kernafval voor vele toekomstige generaties zullen voortduren. Bovendien duurt het naar verwachting minimaal 11 jaar voordat een kerncentrale kan worden gebouwd, wat betekent dat het nog enige tijd duurt voordat we er gebruik van kunnen maken. Verder produceert kernenergie ook kernafval dat heel lang blijft bestaan en daarom toekomstige generaties van last zal zijn. Het bouwen van kernreactoren is bovendien duur, en de inschattingen van de kosten zijn in het verleden vaak ver overtroffen. Angst voor kernrampen, zoals die in Fukushima, heeft ervoor gezorgd dat sommigen vraagtekens zetten bij het opwekken van kernenergie.

Dit zijn de belangrijkste voor- en nadelen met betrekking tot kernenergie ([zie volgende pagina](#)). Echter zijn er nog meer en een opsomming van de verschillende voor- en nadelen kan hieronder gevonden worden.

Argumenten voor het gebruik van kernenergie

- Kernenergie is een vorm van CO₂arme energie die weersafhankelijk is en een constante hoeveelheid energie levert.
- Kernenergie kan ingezet worden om de broeikasgassen te verminderen en zo bij te dragen aan de klimaatdoelen van 2050.
- Kernenergie zorgt ervoor dat meer energie binnen Nederland geproduceerd kan worden en dat Nederland daardoor minder afhankelijk is van het buitenland.
- Kleine modulaire reactoren, SMRs, kunnen gemaakt worden in een fabriek en als module op de juiste locatie gebracht worden waardoor er een beter gecontroleerde omgeving ontstaat, er is een kortere constructie tijd, ze hebben minder koelwater nodig, de reactoren zijn goedkoper, er is inherente veiligheid en ze hebben betere afvalmanagement attributen.
- Het opwekken van kernenergie vindt op enkele locaties plaats waardoor er een voordeel is in het indirecte ruimtebeslag.
- Kernenergie wekt meer energie op per vierkante meter dan windmolens en zonnepanelen.

Argumenten tegen het gebruik van kernenergie

- Afvalverwerking van radioactief afval is ingewikkeld doordat het afval honderden tot vele duizenden jaren gevaarlijk kan blijven. Nieuwe boorgattechnieken doen hier enigszins aan dit effect af.
- Afvalverwerking zadelt vele toekomstige generaties op met de gevolgen van kernafval.
- Het zal naar verwachting minimaal 11 jaar duren voordat een kerncentrale gebouwd is. Wegens deze lange ontwikkeltijd kan kernenergie weinig betekenen voor de klimaatdoelen op korter termijn.
- Het bouwen van kernreactoren is duur en de inschatting van de kosten zijn de laatste jaren ver overtroffen. Ook de ontmanteling van een kerncentrale is duur. Al met al leidt dit, naar verwachting, tot elektriciteit dat flink duurder is dan elektriciteit opgewekt met zon of wind. Ook de ontmanteling van een kerncentrale is duur. Al met al leidt dit, naar verwachting, tot elektriciteit dat flink duurder is dan elektriciteit opgewekt met zon of wind.
- Besluitvorming rondom kernenergie is complex en veelomvattend.
- Het gebruik van kernenergie heeft door kernrampen zoals in Fukushima, in het verleden tot grote negatieve effecten op de gezondheid van mens en natuur hebben geleid. De Nieuwe generatie 4 reactoren bieden mogelijkheden op het gebied van veiligheid en efficiëntie.
- Nieuwe generatie 4 reactoren zijn nog in de beginfase en zullen nog veel 'kinderziektes' hebben.
- Kernenergie is een relatief centrale vorm van opwek, waardoor transportcapaciteit (relatief veel) moet worden uitgebreid om de vraag te faciliteren.

10 | Referenties

Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming. (2014, December 24). *Hoe werkt de kerncentrale van Borssele?* - Autoriteit NVS. Onderwerpen. www.autoriteitnvs.nl/onderwerpen/nucleaire-installaties/vraag-en-antwoord/hoe-werkt-de-kerncentrale-van-borssele

de Blauw, P. (2022, October 6). *Toch kernenergie in Nederland, met kleinere centrales?* Nos.nl. <https://nos.nl/nieuwsuur/artikel/2447301-toch-kernenergie-in-nederland-met-kleinere-centrales>

European Nuclear Energy Forum. (2019). *ENEF Secretariat's Conclusions*. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-06/enef2019conclusions_0.pdf

Gamboa Palacios, S., & Jansen, J. (2018). *Nuclear energy economics: An update to Fact Finding Nuclear Energy*. In TNO.nl. <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A76dba37c-e6aa-493e-80c1-298faa63125e>

IAEA. (2021). *Site Evaluation for Nuclear Installations*. IAEA.

International Energy Agency. (2022). *Nuclear Power and Secure Energy Transitions From today's challenges to tomorrow's clean energy systems*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

Jetten, R. (2022, July 1). *Kamerbrief over acties die zijn ingezet op het gebied van kernenergie* [kamerbrief aan De Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal].

Lovering, J. R., Yip, A., & Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011>

Mignacca, B., & Locatelli, G. (2020). Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109519. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen*. www.autoriteitnvs.nl/onderwerpen/nationale-programma-radioactief-afval/documenten/publicatie/2016/06/24/nationale-programma-radioactief-afval

Pioro, I. L. (2016). *Handbook of generation IV nuclear reactors*. Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.

Scheepers, M., de Haas, G.-J., Roelofs, F., Jeeninga, H., & Gerdes, J. (2021). *De rol van kernenergie in de energietransitie van Noord-Brabant*. In TNO.nl. <https://www.tno.nl/nl/newsroom/2021/03/rol-kernenergie-energietransitie-noord/>

Stralingsbescherming, A. N. V. en. (2015, February 18). *Kerncentrale Borssele - Autoriteit NVS*. www.autoriteitnvs.nl. <https://www.autoriteitnvs.nl/onderwerpen/kerncentrale-borssele-epz>

Stralingsbescherming, A. N. V. en. (2021, May 25). *COVRA: opslag radioactief afval - Autoriteit NVS*. www.autoriteitnvs.nl. <https://www.autoriteitnvs.nl/onderwerpen/covra>

van de Vate, L. (2018). *Eindberging hoogradioactief afval met diepe boorgaten bij de kerncentrale Borssele*. Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

van der Zwaan, B. (2019, October 23). *Kernenergie in de praktijk*. *Parlement & Wetenschap*. https://parlementenwetenschap.nl/wp-content/uploads/2021/02/2019_Wetenschappelijke_factsheet_Van_der_Zwaan_Kernenergie.pdf

World Nuclear Association. (2017). *Thorium - World Nuclear Association*. World-Nuclear.org. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>

World Nuclear Association. (2018). *Nuclear Power in Belgium | Belgian Nuclear Energy - World Nuclear Association*. World-Nuclear.org. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/belgium.aspx>

World Nuclear Association. (2019a). *Nuclear Power in France | French Nuclear Energy - World Nuclear Association*. World-Nuclear.org. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>

World Nuclear Association. (2019b). *Nuclear Power in Germany - World Nuclear Association*. World-Nuclear.org. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>

World Nuclear Association. (2020, December). *Generation IV Nuclear Reactors: WNA - World Nuclear Association*. World-Nuclear.org. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

Colofon

Uitgave

Provincie Fryslân

Ppostbus 20120

8900 HM Leeuwarden

Telefoon: (058) 292 59 25

E-mail: provincie@fryslan.frl

Informatie

Voor meer informatie over het Kennisdossier Kernenergie kunt u een e-mail sturen naar energie@fryslan.frl of bellen naar 058 292 59 25.

Vormgeving

Provincie Fryslân

Disclaimer toegankelijkheid

Dit rapport is zoveel mogelijk digitaal toegankelijk gemaakt.

Heeft u vragen of wenst u aanvullende informatie?

Neem dan contact op met de provincie Fryslân.

We helpen u graag verder. Dat kan telefonisch via 058 2925925 of mail naar provincie@fryslan.frl.

November 2023