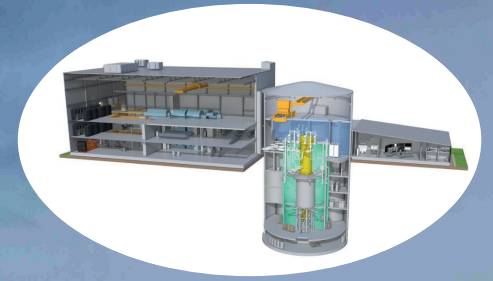


Wim Turkenburg is natuurkundige, als emeritus-hoogleraar 'Science, Technology & Society' betrokken bij de Universiteit Utrecht en als consultant bij WTEEC te Amsterdam.



Weergave van een kerncentrale gebaseerd op de BWRX-300. Afbeelding: GE Hitachi

Hoe snel dragen nieuwe kleine kerncentrales (SMR's) commercieel bij aan de energievoorziening?

Inleiding

In de literatuur zijn verschillende overzichtsstudies te vinden over de ontwikkeling van een nieuwe generatie kleine kerncentrale, Small Modular Reactors (SMR's) geheten¹, die een rol kunnen spelen in onze toekomstige energievoorziening. In debatten in ons land wordt over SMR's vaak de opmerking gemaakt dat ze al op korte termijn ook in

Nederland inzetbaar zijn. Nuclear-21, een adviesbureau voor het toepassen van kernenergie, noemde daarbij in juli 2022, in een studie voor de Provincie Limburg en ook in voordrachten als jaartal 2028, uiterlijk 2030². Aan de Nuclear-21 studie verbonden ook DNV, Stork en Evocati Consulting Alliance hun naam. Berichten over de mogelijke betekenis van SMR's zoals verwoord in het

Nuclear-21 rapport, vonden een gewillig oor bij vele fracties in de Tweede Kamer³.

Zelf stelde ik in een notitie voor de Provincie Overijssel (nov. 2022), dat realisatie van een commerciële energieleverende SMR in ons land niet voor 2045 valt te verwachten⁴. In het maatschappelijke debat lijkt het jaartal inmiddels te zijn opgeschoven naar rond



2035⁵, terwijl het ministerie van EZK in haar SMR-notitie van 22 maart 2024 het jaartal 2040 noemde⁶.

Afgelopen februari publiceerde de Nuclear Energy Agency (NEA) een studie onder de titel *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition* die kan helpen hier meer zicht op te krijgen⁷. Het is een update van de SMR Dashboard studie die NEA een jaar eerder uitbracht⁸. Beide geven een beeld van de vorderingen die per type SMR zijn gemaakt en van de weg die nog moet worden afgelegd.

In dit artikel vatten we de bevindingen samen. Ook maken we een vergelijking met de bevindingen in 2023. Daarnaast gaan we voor ieder SMR na wanneer de ontwikkeling van start is gegaan. Samengevat in een figuur geeft dit een beeld van de vorderingen die de laatste 35 jaar zijn gemaakt. Ook maakt het plaatje een vergelijking tussen de SMR's qua voortgang mogelijk.

De NEA-studie laat zien dat een commerciële SMR nog nergens draait. Wel draaien er enkele proefreactoren. Van een fabrieks-

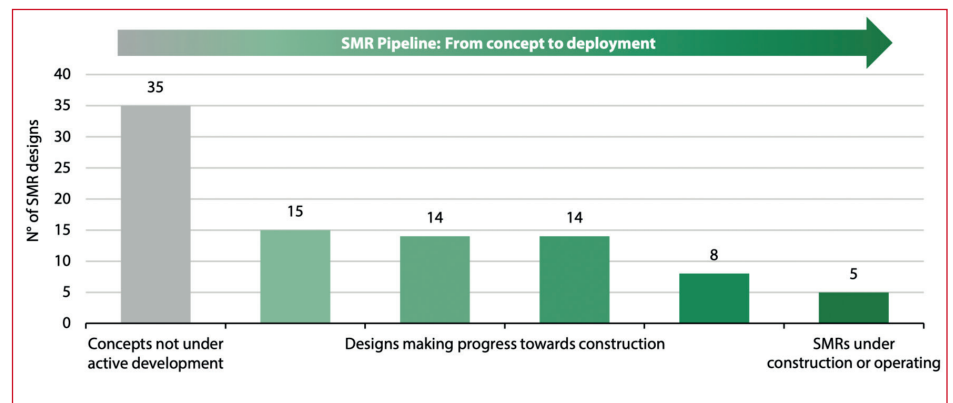
matige, 'LEGO-achtige' productie van (onderdelen van) SMR's is nog nergens sprake. De hier gepresenteerde analyses laten zien dat de ontwikkelingstijd van een SMR – van een idee over het concept tot aan een commerciële energieleverende centrale – tot op heden zo'n 30 jaar vergt, plus of min 5 jaar. We bespreken in hoeverre dit sneller kan. Ook de kosten van SMR's zijn hierbij bepalend en krijgen aandacht.

De NEA SMR Dashboard-studie van 2024

Wereldwijd werken zowel kennisinstellingen

en startups als grote gevestigde nucleaire industrieën aan het onderzoeken en ontwikkelen van in totaal meer dan 120 concepten voor een SMR. In de NEA-studie van februari 2024 zijn 98 van deze concepten bekeken. Een groot deel betreft nog studies op papier. Voor 56 concepten geldt dat daadwerkelijk voortgang richting realisatie is geboekt. Figuur 1 geeft hiervan een overzicht.

Voor ieder van deze concepten heeft NEA in beeld gebracht wat de vorderingen zijn. Daarbij is gekeken naar: (1) *Licensing*; (2) *Siting*; (3) *Financing*; (4) *Supply chain*; (5)



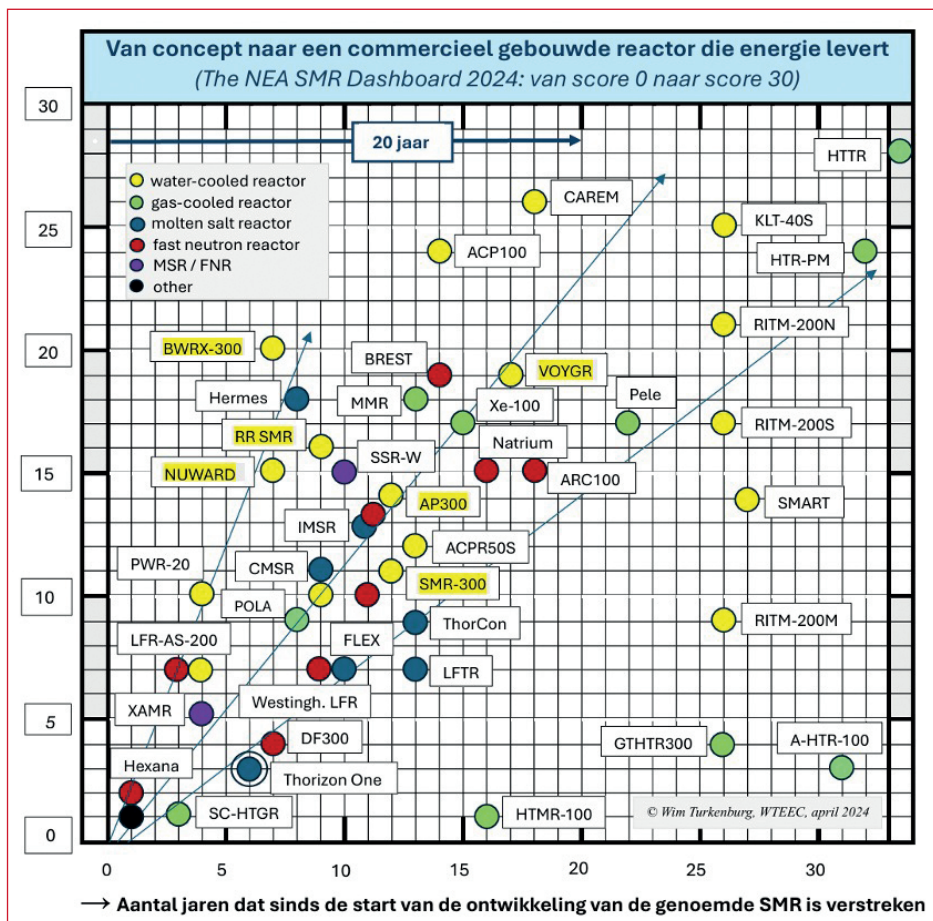
Figuur 1. De SMR-pijplijn van concept naar eerste commerciële toepassing. Bron: NEA, 2024.

	0	1	2	3	4	5
Licensing	No information	Pre-licensing	Licence/construction/design certification application submitted	Design approved	Licence to construct approved	Licence to operate approved
* Bonus for multiple jurisdictions						
Siting	No information	Non-binding agreements/MoUs/ non-binding announcements	Site owner has shortlisted the technology	Site owner has selected the technology	Received permit(s) and/or licence(s) for construction on the site	Construction has started on the site
* Bonus for multiple sites						
Financing⁽¹⁾	No information	At least one announcement	Five or more announcements or USD 100 million	Ten or more announcements or USD 500 million	FOAK is fully financed	FOAK financed + progress for NOAK finance
Supply chain⁽²⁾	No information	Supplier days/events/workshops/trade shows/ non-binding agreements/MoUs/ non-binding announcements	Binding contracts for services & materials	Partnerships/joint ventures/consortia - all with EPCs	FOAK construction ongoing/complete	NOAK construction ongoing
Engagement^(3,4)	No information	One or more engagements	Three or more engagements	Five or more engagements	Seven or more engagements	Ten or more engagements
Fuel	No information	Non-binding agreements & studies with national labs for RDD/Lab-scale production of fuel	Contracts/agreements with fuel supply chain (uranium/conversion/enrichment/fabrication)	Operating fabrication facility producing fuel, or uses same fuel as existing/generation-III commercial reactors	Contracts for fuel for FOAK	Fuel loading has begun

Tabel 1. Definitie criteria die NEA in haar SMR-dashboard studies gebruikt. Bron: NEA, 2024.

Rank	Ontwikkelaar reactor	Naam reactor	Vermogen in MW(th)	NEA score 2023	NEA-score 2024	Type reactor	Startjaar project
01	JAEA (Japan)	HTTR	30	28	28	Gas-cooled	1987
02	CNEA (Argentina)	CAREM	100	22	26	Water-cooled	2006 (1984)
03	Rosatom (Russia)	KLT-40S	2x150	24	25	Water-cooled	1998
04	CNNC (China)	ACP100	385	22	24	Water-cooled	2010
05	INET (China)	HTR-PM	2x250	24	24	Gas-cooled	1992 (1986)
06	Rosatom (Russia)	RITM-200N	190	17	21	Water-cooled	Zie KLT-40
07	GE Hitachi Nucl. En. (USA)	BWRX-300	870	19	20	Water-cooled	2017 (2007)
08	NIKIET (Russia)	BREST-OD-300	700	19	19	FNR	2010
09	NuScale Power (USA)	VOYGR	250	20	19	Water-cooled	2007
10	Kairos Power (USA)	Hermes	35	16	18	MSR	2016
11	UltraSafe Nuclear (USA)	MMR	10-50	11	18	Gas-cooled	2011
12	X-energy (USA)	Xe-100	200	16	17	Gas-cooled	2009
13	BWX Technologies (USA)	Project Pele	(3-15)	16	17	Gas-cooled	2002
14	Rosatom (Russia)	RITM-200S	2x198	17	17	Water-cooled	Zie KLT-40
15	Rolls-Royce SMR (UK)	RR SMR	1358	16	16	Water-cooled	2015
16	NUWARD (France)	NUWARD SMR	2x540	14	15	Water-cooled	2017
17	Moltex Energy (Canada)	SSR-W	750	13	15	MSR / FNR	2014
18	TerraPower (USA)	Natrium Reactor	840	14	15	FNR	2008
19	ARC Clean Technology (USA)	ARC-100	286	12	15	FNR	2006
20	Westingh. El. Com. (USA)	AP300 SMR	990	-	14	Water-cooled	2012
21	KAERI (Korea)	SMART	365	14	14	Water-cooled	1997
22	Oklo (USA)	Aurora Powerh.	40	9	13	FNR	2013
23	Terrestrial Energy (Canada)	IMSR	884	12	13	MSR	2013
24	CGN (China)	ACPR50S	200	21	12	Water-cooled	2011
25	Seaborg Technol. (Denmark)	CMSR	250	8	11	MSR	2015
26	Holtec International (USA)	SMR-300	1000	11	11	Water-cooled	2012
27	Westingh. El. Com. (USA)	eVinci micro	15	8	11	Other	PM
28	Last Energy (USA)	PWR-20	60	10	10	Water-cooled	2020
29	SPIC (China)	HAPPY200	200	10	10	Water-cooled	2015
30	Blykalla (Sweden)	Sealer-55	140	9	10	FNR	2013
31	UltraSafe Nuclear (USA)	Pylon D1	1	-	10	Gas-cooled	PM
32	NCNR (Poland)	HTGR POLA	30	-	9	Gas-cooled	2016
33	ThorCon Internat. (UAE)	ThorCon 500	2x557	5	9	MSR	2011
34	Rosatom (Russia)	RITM 200M	2x198	8	9	Water-cooled	Zie KLT-40
35	Radiant Industries (USA)	Kaleidos	2	4	9	Gas-cooled	PM
36	NewCleo (UK)	LFR-AS-200	480	5	7	FNR	2021
37	UWB & CIIRC CTU (Czechia)	TEPLATOR	170	6	7	Water-cooled	2020
38	Westingh. El. Com. (USA)	Westingh. LFR	990	4	7	FNR	2015
39	MoltenFLEX (UK)	FLEX	60	-	7	MSR	2014
40	Flibe Energy (USA)	LFTR	600	-	7	MSR	2011
41	BWX Technologies (USA)	BANR	50	6	7	Gas-cooled	PM
42	NAAREA (France)	XAMR	80	-	5	MSR / FNR	2020
43	Dual Fluid Energy (Canada)	DF300	600	2	4	FNR	2017
44	JAEA (Japan)	GTHTR300	600	4	4	Gas-cooled	1998
45	Thorizon (Netherlands)	Thorizon One	250	-	3	MSR	2018
46	Gorgé (France)	Calogena	30	-	3	Water-cooled	PM
47	Jimmy (France)	Jimmy SMR	10	2	3	Gas-cooled	2021
48	Eskom (South Africa)	A-HTR-100	100	-	3	Gas-cooled	1993
49	Hexana (France)	HEXANA	2x400	-	2	FNR	2023
50	CVR (Czechia)	Energy Well	20	2	2	MSR	PM
51	Framatome (USA)	SC-HTGR	625	-	1	Gas-cooled	2021
52	Stratek Global (South Africa)	HTMR-100	100	-	1	Gas-cooled	2008 (1993)
53	Toshiba Energy Syst. (Japan)	4S	30 & 135	1	1	FNR	PM
54	Blue Capsule Techn. (France)	Blue Capsule	150	-	1	Other	2022
55	Otrera Nuclear En. (France)	Otrera 300	300	-	0	FNR	2023
56	Toshiba Energy Syst. (Japan)	Movelux	10	-	0	Other	PM
(57)	Urenco (UK)	U-Battery	10	9	x	Gas-cooled	2013 ?

Tabel 2. Bevindingen NEA SMR dashboard studie 2023 en 2024 & startjaar ontwikkeling SMR



Figuur 2. De voortgang van de ontwikkeling van SMR's in de tijd, van concept (0 NEA-punten) tot commerciële kerncentrale die startklaar is (30 NEA-punten). © Wim Turkenburg, WTEEC, Amsterdam, april 2024.

Engagement; (6) Fuel. Gekoppeld aan de stand van zaken kent NEA aan een SMR-concept per criterium maximaal 5 punten toe. In Tabel 1 wordt dit toegelicht. In totaal zijn per SMR dus maximaal $6 \times 5 = 30$ punten te behalen. Krijgt een SMR score 30, dan is er sprake van een eerste commerciële reactor die startklaar is voor het leveren van energie aan gebruikers.

Een soortgelijke studie heeft NEA in 2023 gedaan. Die bevatte wel minder SMR's. Het aantal punten dat NEA in totaal aan ieder van de SMR's in 2023 en in 2024 heeft toegekend staat weergegeven in Tabel 2. In de tabel hebben we ook een ranking aangebracht: de SMR met de hoogste score in 2024 (28 punten) staat op nummer 1, de SMR met de laagste score in 2024 (0 punten) op nummer 56.

Aanvullend hebben we in de tabel informatie toegevoegd die niet in de NEA-studie is te vinden: het jaar waarin met de ontwikkeling van de betreffende SMR is begonnen. Het was niet makkelijk dit gegeven voor

alle reactoren te achterhalen, daarin kunnen dus onnauwkeurigheden zitten. Per SMR is hiervoor een bron gevonden. Aanvullend moet worden opgemerkt dat aan de start van de ontwikkeling van een nieuw concept doorgaans al enkele jaren van verkennend onderzoek vooraf is gegaan; de tijd hiervoor is niet meegeteld. Ook kan het soms gaan om een SMR ontwerp dat is afgeleid van een eerder generaliseerd concept. Dit laten we hier buiten beschouwing tenzij de overlap tussen de twee concepten heel erg groot is.

In Figuur 2 zijn de bevindingen per SMR grafisch in beeld gebracht. Langs de horizontale as staat het aantal jaren dat sinds de start van de ontwikkeling van de SMR is verstreken en langs de verticale as de NEA-totaalscore. Via kleuren is helder gemaakt om welk type SMR het gaat. De in de tabel weergegeven micro- en minireactoren met een lage score, en ook de SMR's met score nul, zijn niet in Figuur 2 opgenomen⁹.

De figuur laat zien dat nog geen van de SMR's het einddoel heeft bereikt, ook niet die waaraan inmiddels al 25 tot 35 jaar is gewerkt. Het verst gevorderd zijn drie licht-waterreactoren, CAREM (Argentinië), KLT-40S (Rusland) en ACP100 (China), en twee hoge-temperatuur gasgekoelde reactoren, te weten HTR (Japan) en HTR-PM (China). De ontwikkeling van twee andere typen SMR, snelle neutronen reactoren en gesmolten-zoutreactoren, kwam later van de grond, na respectievelijk 2005 en 2010. Figuur 2 laat zien dat deze reactoren verder van de markt af staan.

Figuur 2 suggereert ook een wat asymptotisch verloop van de voortgang. De ontwikkeling van een nieuw concept kan in de beginjaren relatief snel verlopen, maar vertraagt in het stadium van demonstratie en wordt tijdrovend wanneer naar commercialisatie, marktintroductie en bouw van de eerste reactor wordt gestreefd. Voor nieuwe technologie is dit overigens een gebruikelijk beeld.

Ontwikkelingen sinds de NEA SMR Dashboard studie van 2023

In 2023 publiceerde NEA haar eerste dashboard studie. Hier gaan we na welke veranderingen zich sindsdien hebben voorgedaan.

In 2023 bevatte het dashboard van NEA 42 SMR's die, net als in 2024, op de zes genoemde criteria werden beoordeeld; van deze reactoren waren er 30 groter dan 50 MW(th).

In het dashboard van 2024 zijn er 15 reactoren bij gekomen en viel er 1 af. Bij elkaar opgeteld kregen de 15 nieuwkomers 66 punten, gemiddeld dus ruim 4 punten per SMR.

Een van de nieuwkomers is *Thorizon One*, een gesmolten-zoutreactor van 250 MW(th) die sinds 2018 door de Nederlandse, en inmiddels ook Franse startup Thorizon wordt ontwikkeld en van NEA 3 punten kreeg. De nieuwkomers die in 2024 het hoogst binnenkwamen zijn AP300-SMR (USA) met 14 punten, HTGR-POLA (Polen) met 9 punten, en FLEX (UK) met 7 punten.

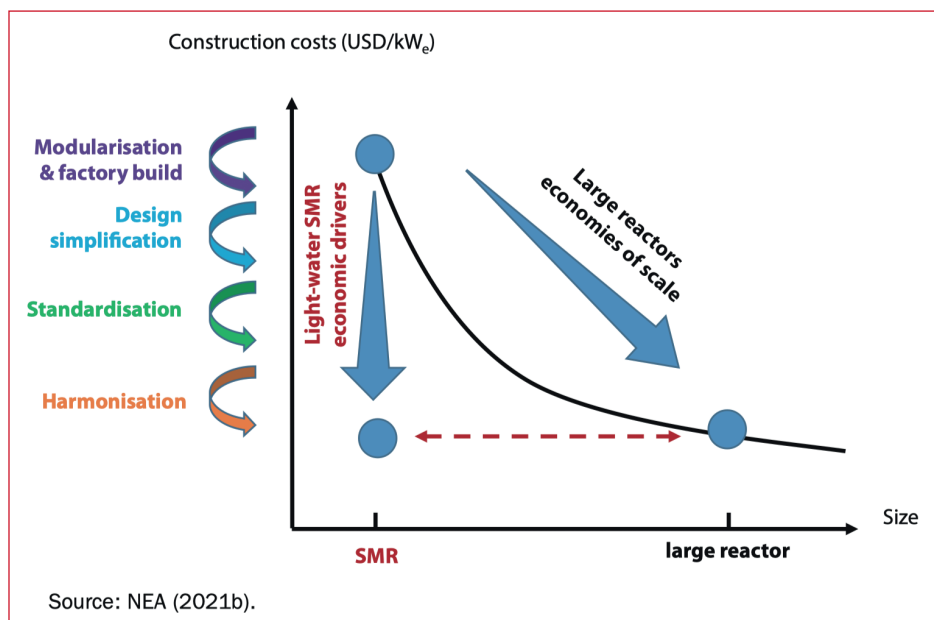
We gaan na hoe de 42 concepten waarover NEA in 2023 rapporteerde zich hebben ontwikkeld; is hun score in de periode 2023-2024 toegenomen, afgenomen of constant gebleven?

De meeste reactoren blijken een of twee punten vooruit te zijn gegaan. Van de SMR's die in Figuur 2 staan heeft de minireactor MMR van Ultra Safe Nuclear Corporation (USA) de grootste vooruitgang laten zien, van 11 naar 17 punten. Nummer 2, minireactor CAREM van CNEA (Argentinië), ging van 22 naar 26 punten; de bouw van deze reactor verloopt overigens al jaren met horten en stoten¹⁰. Nummer 3, de microreactor Aurora Powerhouse van Oklo (USA), ging van 9 naar 13 punten.

Bij 12 reactoren bleef het puntenaantal gelijk. Bij twee concepten is het aantal punten gedaald. Dit zijn ACPR50S van CGN (China) die van 21 naar 12 punten ging, en de VOYGR van Nuscale Power die zakte van 20 naar 19 punten.

Eén concept is in 2024 uit de lijst verdwenen: de U-Battery, een hoge-temperatuur gasgekoelde microreactor met een vermogen van 10 MW(th) die als concept is ontwikkeld door Urenco-UK in samenwerking met enkele universiteiten waaronder de TU Delft. In Nederland kreeg de reactor als een interessant en kansrijk concept in vakkringen relatief veel aandacht. NEA waardeerde de voortgang in 2023 nog met 9 punten. Volgens Urenco was het echter nimmer de bedoeling de reactor zelf te demonstreren en naar de markt te brengen. Gehoopt werd op overname door een andere partij. Dat is niet gelukt. Daarom heeft Urenco de U-Battery maart 2023 in de ijskast gezet¹¹.

Voor alle SMR's uit NEA Dashboard 2023 tezamen geldt dat in het afgelopen jaar, op de NEA-schaal van 0 tot 30, de voortgang gemiddeld 1 punt bedroeg. Dit is bescheiden en suggereert dat de totale ontwikkelings-tijd van een SMR, gemiddeld genomen, zo'n 30 jaar bedraagt – in lijn met het beeld dat Figuur 2 geeft. Volgens het New Nuclear Watch Institute (NNWI) is er overigens al



Figuur 3. Belangrijke economische factoren om schaalnadelen te compenseren. Bron: NEA, 2024.

10-15 jaar sprake van 'bescheiden progressie'¹².

De 27 SMR's die in 2023 tussen 0 en 15 punten zaten, gingen in 2024 vooruit met gemiddeld 1,4 punt. De 15 SMR's die in 2023 tussen 16 en 30 punten zaten, gingen er gemiddeld 0,4 punt op vooruit, dus ruim een factor 3 minder. Beperken we ons tot de 30 reactoren groter dan 50 MW(th), dan is de afname ruim een factor 5 (1,4 tegenover 0,25). Dit suggereert dat de voortgang van 0 naar 30 eerder asymptotisch dan lineair verloopt, zoals al opgemerkt en toegelicht bij de bespreking van Figuur 2. Deze bevinding wordt ondersteund door nog een andere evaluatie van alle data. Van de genoemde 30 reactoren met een vermogen groter dan 50 MW(th) ging bij 19 ontwerpen de ontwikkeling meer dan 10 jaar geleden van start. In 2023 verbeterden deze reactoren hun score met gemiddeld 0,7 punt. Bij de 11 reactoren waarvan de ontwikkeling meer recent, in de laatste 10 jaar, van start ging was deze toename gemiddeld 1,4 punt. Ook dit suggereert een trager wordende voortgang naar mate het einddoel wordt genaderd.

De kosten van SMR's

De snelheid waarmee commerciële SMR's op de markt komen, hangt mede af van zowel de bouw- als de operationele kosten. De genoemde rapporten van NEA maken duidelijk dat, heel algemeen gesteld, SMR's forse stappen moeten zetten om economisch te

concurreren met grote, geavanceerde lichtwaterreactoren. Er is bij SMR's immers sprake van 'diseconomies of scale'. Figuur 3, gemaakt door NEA, illustreert dit. De kostenverlaging die bij SMR's per eenheid van vermogen moet worden gerealiseerd vergt harmonisatie, standaardisatie, simplificatie en modularisatie van de reactor, naast ook seriematige massaproductie van (onderdelen van) de reactor. Doorgaans zal er dan pas bij de bouw van de 10^{de} of 20^{ste} reactor sprake kunnen zijn van lagere constructiekosten ('overnight costs') en lagere bouwkosten (constructiekosten plus bouwrenteverlies) vergeleken met het bouwen van grote kerncentrales, maar zeker is dit niet¹³.

Figuur 3 laat overigens ook zien dat het kan lonen om het vermogen van de SMR te vergroten. Bij diverse ontwerpen is dit inmiddels gebeurd, soms meerdere malen. Ook de beoogde toepassing van de SMR – bijvoorbeeld het kunnen vervangen van kolencentrales – kan hierbij een rol spelen.

Opvallend is dat in de periode 2020-2023 veel ontwikkelaars van SMR's hebben gesteld dat de constructiekosten van een *First-of-a-Kind* (FOAK) reactor, uitgebouwd tot energiecentrale, waarschijnlijk zo'n \$ 5.000 per kW(el) zullen bedragen, mogelijk minder¹⁴. De ervaringen tot op heden laten echter zien dat bij concrete projecten de begrote bouwkosten, wanneer het op werkelijk bouwen aankomt,

veel hoger liggen, oplopend tot \$ 20.000 per kW(el) of meer¹⁵. De voorgenomen bouw van een kerncentrale in Idaho met zes Nuscale reactoren van ieder 77 MW(el) is hierbij illustratief. Dit plan is november 2023 afgeblazen vanwege de steeds verder stijgende schattingen van de bouwkosten. Hierdoor verloren de potentiële gebruikers van de centrale – een groep van energiebedrijven – hun belangstelling¹⁶. In diverse reacties is geprobeerd hier lering uit te trekken¹⁷. Overigens meldde de IEA in juni 2022 dat in veel gevallen de constructiekosten van een SMR zullen moeten dalen tot minder dan \$ 3.000 per kW(el) om economisch aantrekkelijk te zijn¹⁸.

De stijging van de bouwkosten in Idaho waren vooral een gevolg van sterk gestegen materiaal- en rentekosten¹⁹. Een andere oorzaak vormen de strenge veiligheidseisen waaraan kernreactoren moeten voldoen²⁰. Zo moeten kleine reactoren in veel landen bestand zijn tegen de inslag van een groot verkeersvliegtuig, net als grote reactoren. Bij de voorbereiding van de bouw van de Pallasreactor in Petten – een reactor van 35 MW(th) die is bedoeld voor het doen van onderzoek en het produceren van medische isotopen – was deze eis één van de redenen waarom de schattingen van de constructiekosten gaandeweg hoger werden. De vraag moet worden gesteld of deze veiligheidseisen voor kleine SMR's niet te streng is²¹.

Door massaproductie kunnen de constructiekosten van een SMR worden verlaagd. De bouw van fabrieken voor serieproductie vindt echter alleen plaats wanneer de fabrikant jaarlijks 10 of 20 SMR's kan verkopen. Daarvoor is weer nodig dat de technologie zich heeft bewezen en de kosten van de SMR marktconform zijn. Hier is dus sprake van een impasse. Overheden of zeer kapitaalcrachtige ondernemers zijn nodig om deze impasse te doorbreken.

Naast bouw- en constructiekosten spelen ook andere kosten die de concurrentiepositie van SMR's ten opzichte van grote geavanceerde LWR's momenteel niet direct verbeteren²². Zo zijn de kosten voor bediening en onderhoud en voor *security* per eenheid geleverde

energie bij een SMR normaal gesproken hoger. Beneden 200 MW(el) zijn voor bediening en onderhoud – bij de huidige manier van werken – zo'n 100 personen nodig²³. Bij een kerncentrale van 20 MW(el) zouden dan alleen al de personeelskosten uitkomen op ongeveer 5 cent per kWh.

Een potentieel probleem voor de bouw van kleine reactoren vormen ook de ontmantelingskosten. Die hangen van vele factoren af²⁴ en zijn voor kleine reactoren zeer onzeker. Voor grote reactoren (LWR's) worden ze in de VS op ongeveer 300-400 miljoen dollar geschat²⁵, minder dan 15 procent van de constructiekosten. Voor de afbraak van de 58 MW(el) kerncentrale in Dodewaard zijn de nu begrote kosten echter 243-333 miljoen euro²⁶; voor inflatie gecorrigeerd ligt dat niet ver af van de oorspronkelijke investeringskosten (345 mln in euro's van begin 2023). Bij het ontwikkelen en bouwen van een SMR behoeven de ontmantelingskosten expliciet aandacht. Al in de ontwerpfase moet worden nagegaan hoe deze kosten zo laag mogelijk zijn te houden.

De splijtstof die in de SMR moet worden gebruikt kan bij zowel de kleinere lichtwaterreactoren als bij niet-lichtwaterreactoren sterk afwijken van wat nu gangbaar is²⁷. Dit kan leiden tot hogere kWh-kosten en bij gebruik van HALEU-splijtstof - High-Assay Low-Enriched Uranium, wat een U-235 gehalte heeft tussen 5 en 20 procent – vooral nog ook tot afhankelijkheid van Rusland²⁸.

Het radioactief afval van een SMR kan daarom een andere omvang (in kubieke meters) hebben, maar ook een andere samenstelling en levensduur dan het afval van een grote LWR. Dit kan leiden tot zowel voor- als nadelen, afhankelijk van het type SMR. Dit vergt nader onderzoek²⁹.

Voorspelt het verleden de toekomst?

De ervaringen tot nu toe suggereren dat het ontwikkelen en realiseren van commerciële SMR's 30 jaar of meer kan kosten. Dus is een vraag of dit niet sneller kan. Daarover een paar opmerkingen.

De snelheid waarmee de markt wordt bereikt hangt mede af van de complexiteit van de technologie en de problemen die spelen bij bediening en onderhoud van de reactor. Bij bijvoorbeeld een gesmolten-zoutreactor lijken die groter dan bij een lichtwaterreactor. Ook telt de ervaring met de toe te passen technologie en de kennis die alle betrokkenen over de technologie hebben. Lichtwaterreactoren en in wat mindere mate gasgekoelde reactoren scoren op dit punt beter dan andere reactortypen.

De lichtwater SMR die in een relatief korte tijd forse vooruitgang heeft geboekt – en in 2024 van NEA 20 punten kreeg – is de BWRX-300 van GE Hitachi. Met het ontwerp hiervan werd in 2017 begonnen³⁰. Het is het tiende concept in de reeks van nieuwe kokend-waterreactoren die GE Hitachi de afgelopen decennia op de markt heeft gebracht. Het nieuwe concept is afgeleid van de veel grotere ESBWR-reactor van GE Hitachi waarvan de ontwikkeling rond 1992 begon³¹. Kennis over het passief beveiligen van de reactor is onder meer opgedaan met de Dodewaard reactor die in Nederland heeft gedraaid. Diverse landen hebben inmiddels belangstelling voor de BWRX-300 getoond.

De Engelse overheid zet sinds 2016 fors in op de ontwikkeling en realisatie van SMR's in het VK en behoort daarmee internationaal – samen met de VS en Canada – tot de voorhoede. Er wordt ook veel geld voor vrijgemaakt. Begin oktober 2023 zijn zes bedrijven geselecteerd met het verzoek om voor het bouwen van hun SMR in het VK een aanbidding te doen: EDF, GE Hitachi, Holtec Britain, Nuscale Power, Rolls Royce en Westinghouse. Zij ontwikkelen allemaal een lichtwater-SMR – in Figuur 2 zijn de namen van hun reactors geel gearceerd. De Engelse overheid acht deze zes bedrijven het meest in staat een SMR te bouwen die rond 2035 energie levert. Volgens het plan valt voorjaar 2024 het besluit welke bedrijven voor de realisatie van hun reactor steun van de overheid kunnen krijgen. Het streven is om een *Final Investment Decision* (FID) over de te bouwen SMR's in 2029 te nemen³². Mochten de SMR's in 2035 gaan draaien, dan zit er 19 tot 29 jaar ►

tussen de start van de ontwikkeling van de betreffende SMR en de commerciële realisatie ervan als energieleverende centrale, afhankelijk van de gekozen SMR.

Het eventueel bouwen van een *First-of-a-Kind* SMR in een ander land zal in de westerse wereld misschien iets eerder maar niet heel veel sneller resultaat opleveren³³. Wel is denkbaar dat vanaf 2030 een of enkele demonstratie-SMR's in bedrijf kunnen komen³⁴.

Commerciële ondernemingen in Nederland die interesse hebben in het realiseren van een SMR, zullen naar verwachting eerst de resultaten en ervaringen van een FOAK SMR in het buitenland afwachten alvorens zelf een *Final Investment Decision* voor het bouwen van een SMR hier te nemen. Een eerste commerciële SMR zal in ons land dan waarschijnlijk niet voor 2045 in bedrijf zijn, gelet op de tijd die nodig is voor het finaliseren van de voorbereiding van de bouw (2-3 jaar), de verlening van vergunningen (3-5 jaar) en de bouw van de SMR zelf (5-8 jaar). Wel zal dan al vóór 2035, parallel aan de bouw van SMR's in het buitenland, een aantal voorbereidende stappen voor de bouw van zo'n SMR in Nederland moeten zijn gezet. Ook moet aan allerlei andere randvoorwaarden zijn voldaan³⁵.

Het beschikbaar hebben van een SMR in 2040, wat het ministerie van EZK haalbaar acht, vereist dat aan alle randvoorwaarden is voldaan, maar daarnaast dat heel veel voorbereidend werk (waaronder locatiekeuze, detailengineering en regeling van de financiering van de bouw en van het kunnen ontmantelen van de SMR) en ook de vergunningverlening ruim vóór 2035 is afgerond. Erg waarschijnlijk is dit niet, mede gelet op de ervaringen die sinds 2003 jaar zijn opgedaan bij het voorbereiden van de bouw van een nieuwe reactor in Petten, de Pallasreactor³⁶.

De snelle-neutronenreactor die qua ontwikkeling het verst is gevorderd en waaraan sinds 2010 wordt gewerkt, is te vinden in Rusland: de BREST-OD-300 met een ontwerpvermogen van 700 MW(th). De

reactor lijkt enigszins op de SNR-300 die in de jaren zeventig van de vorige eeuw in Duitsland (Kalkar) werd gebouwd. Nederland en België waren daar nauw bij betrokken, maar uiteindelijk werd deze reactor, toen die klaar was, niet in bedrijf gesteld. De BREST-OD-300 is een demonstratiereactor in aanbouw. De ontwikkelaars verwachten dat de reactor in 2026 kan gaan draaien. Hij zal dan eerst zo'n 10 jaar worden beproefd. Daarna zou commerciële benutting kunnen plaatsvinden³⁷. Als dit alles volgens plan verloopt zou er tussen de start van de ontwikkeling van de reactor en het commercieel leveren van energie 26 jaar zitten.

Om een reactor op een concrete locatie te mogen bouwen is onder meer een vergunning van de toezichthouder nodig. In Nederland is dat de ANVS. Om de vergunningsprocedure zo kort mogelijk te houden, is het raadzaam dat de ontwikkelaars van nieuwe reactoren er eerst naar streven het ontwerp door toezichthouders gecertificeerd te krijgen. Daarvoor is een *General Design Assessment* dan wel *Vendor Design Review* nodig³⁸. Inclusief alle voorbereiding kan dit zo'n 6 jaar in beslag nemen. Van belang is dat de genoemde certificering voor zoveel mogelijk landen geldt³⁹. Daaraan wordt door toezichthouders gewerkt⁴⁰. Voor het mogen bouwen van de reactor op een concrete locatie kan daar in Nederland vervolgens nog 3 tot 5 jaar bij komen.

Enkele conclusies

De NEA-studie laat zien dat er een reeks van SMR's in ontwikkeling is en er gestaag vooruitgang wordt geboekt richting het te bereiken doel: een commerciële SMR die energie produceert.

Enkele van de SMR's die in ontwikkeling zijn hebben dit doel nu dicht benaderd. Voor deze reactoren geldt dat inmiddels 20 tot 30 jaar aan hun ontwikkeling is gewerkt. Het halen van het einddoel zal nog een aantal jaren vergen.

Figuur 2 suggereert dat de ontwikkelingstijd van een nieuw type SMR, van *start* tot *finish*, historisch gezien op 25 tot 35 jaar

moet worden geschat. De voortgang tussen 2023 en 2024 is hiermee in lijn. Voor grote technologische innovaties is zo'n periode overigens niet abnormaal. De tijd moet leren of voor nieuwere concepten de ontwikkelingstijd kan worden ingeperkt tot zo'n 20-25 jaar. Voor lichtwaterreactoren kan dit haalbaar zijn, met name als de ontwikkeling plaatsvindt door een ervaren en kapitaalkrachtig bedrijf en met steun van de overheid. Realisatie binnen 20 jaar komt dan ook in beeld. Bij overige reactortypen moet voorlopig eerder aan 25-35 jaar worden gedacht, afhankelijk van het betrokken bedrijf, de gekozen technologie en de beschikbare middelen⁴¹.

Denkbaar is dat in de westerse wereld rond 2035 een commerciële FOAK SMR in bedrijf wordt genomen, misschien zelfs iets eerder. Vrijwel zeker zal in Nederland worden afgewacht wat de ervaringen hiermee zijn voordat een definitief investeringsbesluit (FID) wordt genomen over nieuwbouw van een commerciële SMR. Het is dan niet waarschijnlijk dat SMR's vóór 2045 een bijdrage aan de energievoorziening van Nederland zullen leveren. Om 2045 te kunnen halen moeten diverse voorbereidende stappen al vóór 2035 zijn gezet.

Een belemmering voor de bouw van SMR's vormen de relatief hoge bouwkosten van *First-of-a-Kind* reactoren. Wellicht dat pas bij de bouw van de 10^{de} of 20^{ste} reactor deze kosten concurrerend met een grote LWR zullen zijn. De bouwkosten kunnen ook lager worden. Massaproductie van SMR's en het op termijn verkorten van de realisatietijd van een SMR tot 6-8 jaar moet hierbij helpen⁴².

Daarnaast spelen ook splijfstofkosten, bedienings- en onderhoudskosten, en kosten voor het later weer ontmantelen van de reactor. Deze kunnen bij een SMR relatief hoog zijn. Het grootschalig realiseren van SMR's zal daarom nog heel wat voeten in de aarde hebben.

De referenties bij dit artikel zijn te vinden op bit.ly/tijdschriftmilieu

Wim C. Turkenburg - Hoe snel dragen nieuwe kleine kerncentrales (SMR's) commercieel bij aan de energievoorziening?

1. Zie bijv.: NEA, 'Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities', OECD, 2021; NRG, 'Small Modular Reactors, Marktanalyse', mei 2023; NNWI, 'Scaling Success: Navigating the Success of SMR's in Competitive Global Low-Carbon Energy Markets', Dec. 2023; WNA, 'Small Nuclear Power Reactors', Feb. 2024. Het elektrisch vermogen van een SMR is kleiner dan 300 MW(el), maar bij de Rolls-Royce SMR is dit opgerekt tot ongeveer 470 MW(el).
2. Nuclear-21, DNV, Evocatie en Stork, 'Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg', Juli 2022. Het rapport stelt onder meer: "Zowel mini-SMRs als wel SMRs op basis van LWR-technologie zijn een oplossing voor de energiebehoeften vanaf 2030" (pag. 9). En ook: "In ideale omstandigheden [kan een mini-SMR] vanaf eind jaren 2020, doch zeker vanaf 2030, een regionaal regelbaar vermogen aanbieden in de Provincie Limburg" (pag. 13).
3. Zie bijv.: <https://www.kernvisie.com/actueel/nieuws/kamerlid-wil-al-in-2030-kleine-modulaire-kernreactoren.html>
4. Wim Turkenburg, 'Toepassing kernenergie in Nederland en de perspectieven van SMR's', WTEEC, 28 nov. 2022, te vinden op: <https://overijssel.notubiz.nl/document/12238354/2#search=%22turkenburg%22>
5. Zie bijv.: https://gelderland.notubiz.nl/document/13784232/1/Presentatie+dhr_+Schalij+%28Alliantie+Limburg%29
6. Ministerie van EZK, 'Programma-aanpak Small Modular Reactors'. 22 maart 2024 [DGKE 45975158].
7. NEA, 'The NEA Small Modular Dashboard: Second Edition', NEA No 7671 © OECD, March 2024.
8. NEA, 'The NEA Small Modular Reactor Dashboard'. NEA No.7650, © OECD, Feb. 2023 & NEA, 'The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Volume II', NEA No. 7657, © OECD, 2023.
9. Een 'gewone' SMR heeft normaliter een vermogen tussen 150 en 1000 MW(th), een mini-SMR kleiner dan 150 MW(th), en een micro-SMR kleiner dan 30 MW(th).
10. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Construction-of-Argentinas-small-CAREM-25-unit-to>
11. <https://www.neimagazine.com/news/newsurencos-ends-its-support-for-u-battery-advanced-reactor-10694684>
12. NNWI, 'Scaling Success: Navigating the Success of SMR's in Competitive Global Low-Carbon Energy Markets', Dec. 2023, zie: <https://www.newnuclearwatchinstitute.org/report/scaling-success-navigating-the-future-of-small-modular-reactors-in-competitive-global-low-carbon-energy-markets>.
13. Zie ref. 12.
14. Wim Turkenburg, 'Het perspectief van Small Modular Reactors (SMR's)', Tijdschrift Milieu, 2023-03, pp. 44-49.
15. <https://www.utilitydive.com/news/nuscale-uamps-project-small-modular-reactor-ramanasmr-/705717/>
16. <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/uamps-and-nuscale-power-agree-to-terminate-the-carbon-free-power-project>
17. Zie bijv.: [Lessons learned from the recently cancelled NuScale-UAMPS project – Clean Air Task Force \(catf.us\)](https://www.catf.us/lessons-learned-from-the-recently-cancelled-nuscale-uamps-project-clean-air-task-force)
18. IEA, 'Nuclear Power and Secure Energy Transitions', June 2022.

19. [Eye-popping new cost estimates released for NuScale small modular reactor | IEEFA:](#) Wim Turkenburg, 'Zwaar weer voor de SMR van Nuscale', WTEEC, Amsterdam, 24 feb. 2024, zie: https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7167848756703412224?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_feedUpdate%3A%28V2%2Curn%3Ali%3Aactivity%3A7167848756703412224%29
20. <https://energy.mit.edu/news/building-nuclear-power-plants/>
21. <https://thebreakthrough.org/blog/advanced-nuclear-energy-is-in-trouble>
22. Wim Turkenburg, 'Het perspectief van Small Modular Reactors (SMR's)', Tijdschrift Milieu, 2023-03, pp. 44-49.
23. [Technopolis Group, 'De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector', sept. 2022.](#)
24. NEA, 'Cost of Decommissioning Nuclear Power Plants', NEA No. 7201, OECD, 2016.
25. <https://www.nrc.gov/docs/ML0403/ML040340625.pdf>
26. Ministerie van I&W, 'Voornemen overname aandelen GKN door de Staat', 16 mei 2023 [IENW/BSK-2023/96085]; Siempelkamp, 'Kerncentrale Dodewaard (KCD) Decommissioning cost estimate – Update 2023', 6 April 2023.
27. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
28. Zie bijv.: <https://thebreakthrough.org/blog/advanced-nuclear-energy-is-in-trouble>; <https://energypost.eu/can-the-eu-and-us-end-its-dependence-on-russias-nuclear-energy-industry/>. Voor stappen die worden gezet om deze afhankelijkheid in de VS en Europa tegen te gaan, zie onder meer: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Centrus-makes-first-HALEU-delivery>; <https://ca.news.yahoo.com/uk-launch-europe-first-haleu-191400615.html>
29. Edwin Lyman, 'Advanced isn't always better', Union of Concerned Scientists, March 2021; T.K. Kim et al., 'Nuclear Fuel Cycle and Supply Chain', US-DOE, 18 November 2022; Lindsey Krall et al, 'Nuclear waste from small modular reactors', PNAS, 2022, Vol.119, No.2, e2111833119.
30. <https://www.powermag.com/dominion-invests-in-ge-hitachi-development-of-300-mw-smr/>
31. David Hinks and Chris Maslak, 'The next-generation nuclear energy: The ESBWR', Nuclear News, Jan. 2006, pp. 35-40.
32. [world-nuclear-news.org/Articles/UK%20SMR-selection-contest-Six-companies-into-next](https://www.world-nuclear-news.org/Articles/UK%20SMR-selection-contest-Six-companies-into-next)
33. IEA (2022): "Based on recent experience, SMRs may be ready to start to play a role in decarbonising electricity supply from the mid-2030s; zie: 'Nuclear Power and Secure Energy Transitions – From today's challenges to tomorrow's clean energy systems', IEA, June 2022. GE Hitachi hoopt al langere tijd een BWRX-300 in Darlington (Ontario, Canada) te mogen bouwen. Inmiddels wordt gesproken over 4 eenheden aldaar. GE Hitachi stelt dat de eerste nog voor 2030 klaar kan zijn. De vergunningverlening is echter nog niet rond. Met de bouw moet nog worden begonnen. In juni 2022 kondigde het Canadese energiebedrijf SaskPower aan dat ook zij de BWRX-300 voor nieuwbouw hebben geselecteerd. Hun reactor zou rond 2035 stroom moeten gaan leveren.
34. Zie ref. 12.
35. Zoals onder meer beschreven in: KPMG, 'Marktconsultatie kernenergie', 1 juli 2021; Wim Turkenburg, 'Naast tenminste 200.000 MW wind- en zonvermogen in 2050 óók meer dan 45.000 MW gegarandeerd vermogen nodig én energie uit andere bronnen – dan ook kernenergie?', WTEEC, maart 2022; NRG, 'Small Modular Reactor, Marktanalyse', mei 2023.
36. Het principebesluit om in Petten een nieuwe kleine kernreactor te bouwen, de Pallasreactor, werd door NRG in 2003 genomen. Voortgang stagneerde toen de

financiering niet rond kwam. In 2012 is een stichting opgericht die de bouw met steun van de overheid verder moest voorbereiden. De eerste spade voor het leggen van de fundering van de reactor en het reactorgebouw is in 2023 de grond in gegaan. Gehoopt wordt dat met de bouw van de reactor zelf in 2024 kan worden begonnen. In 2031 zou de reactor dan inzetbaar moeten zijn voor het maken van medische isotopen en het doen van onderzoek.

37. [Second tier of containment installed for BREST-OD-300 : New Nuclear - World Nuclear News \(world-nuclear-news.org\)](https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Second-tier-of-containment-installed-for-BREST-OD-300)
38. <https://www.onr.org.uk/new-reactors/onr-gda-gd-006.pdf>; <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/>
39. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/CORDEL-Regulatory-harmonisation-needed-to-speed-SM>
40. Zie bijv.: <https://www.autoriteitnvs.nl/actueel/nieuws/2023/12/06/samenwerken-beoordelingen-kleine-kernreactoren>
41. Zie hierover ook ref. 12.
42. Lijkt ook in Nederland haalbaar indien aan alle randvoorwaarden is voldaan, zie: Wim Turkenburg, *'Het perspectief van Small Modular Reactors (SMR's)'*, Tijdschrift Milieu, 2023-03, pp. 44-49; NRG, *'Small Modular Reactors, Marktanalyse'*, mei 2023, p. 26; https://www.linkedin.com/posts/wim-turkenburg-3539b8a8_huidige-uitzicht-op-nieuwe-kerncentrales-activity-7164590708744519680-bQO2?utm_source=share&utm_medium=member_android