

Over het toepassen van kernenergie en het perspectief van SMR's

Prof. Dr. Wim C. Turkenburg
Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling, Universiteit Utrecht
&
Wim Turkenburg Energy and Environmental Consultancy, Amsterdam

Lezing voor:
Provincie Drenthe
Assen, 3 december 2024

1

De Volkskrant, 21 maart 2023:

VN-klimaatpanel: Slag om klimaat nadert 'beslissende moment'

“Extremes become more widespread and pronounced with every increment of warming”

Sixth Assessment Report
Synthesis Report
20 March 2023

ipcc

OPWARMING AARDE

Verandering oppervlaktetemperatuur aarde in graden Celsius, vergeleken met 1850 - 1900, bij verschillende scenario's

Scenario's

5°C
4
3
2
1
0
-1

1950 2000 2050 2100

210323 © de Volkskrant, Bron: IPCC

“Alleen met draconische maatregelen kan de wereld een opwarming met meer dan 1,5 graad (in 2100) voorkomen. Zelfs 4 graden opwarming eind deze eeuw is niet uitgesloten. Dat stelt het VN-klimaatpanel in een nieuwe samenvatting van de stand van zaken.”

Bron: De Volkskrant, 21 maart 2023

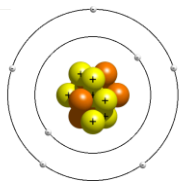
a) Net global greenhouse gas (GHG) emissions

Implemented policies result in projected emissions that lead to warming of 3.2°C, with a range of 2.2°C to 3.5°C

■ Implemented policies (median, with percentiles 25-75% and 5-95%)
 ■ Limit warming to 2°C (-67%)
 ■ Limit warming to 1.5°C (-50%) with no or limited overshoot
 — Past emissions (2000-2015)
 I Model range for 2015 emissions
 — Past GHG emissions and uncertainty for 2015 and 2019 (dot indicates the median)

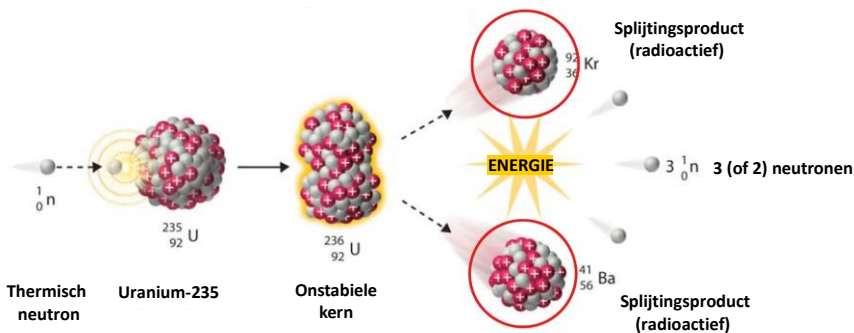
2

Kernsplijting: het genereren van warmte door splijting van een zware atoomkern (bijv. U-235, U-233 of Pu-239)



Samenstelling van een atoom:

- een kern die uit *protonen* en *neutronen* bestaat.
- *elektronen* die om de kern heen cirkelen.

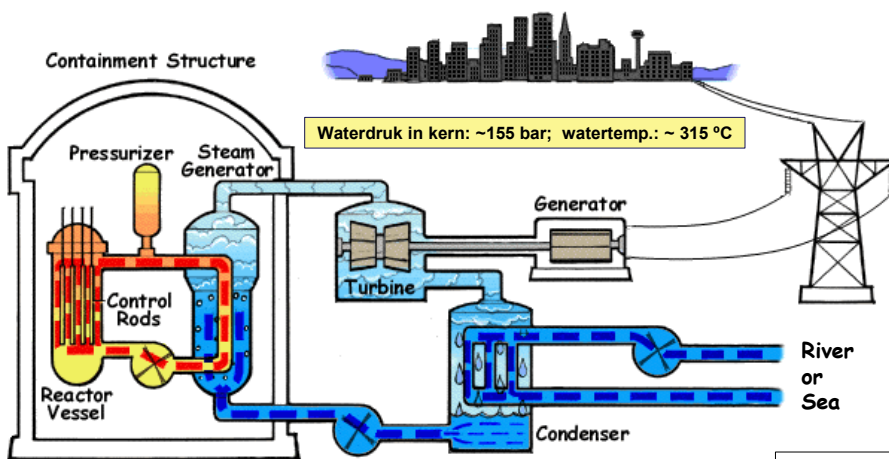


Chemwiki, CCPL

3

3

Werking van een drukwaterreactor (PWR) zoals in Borssele, Doel en Tihange

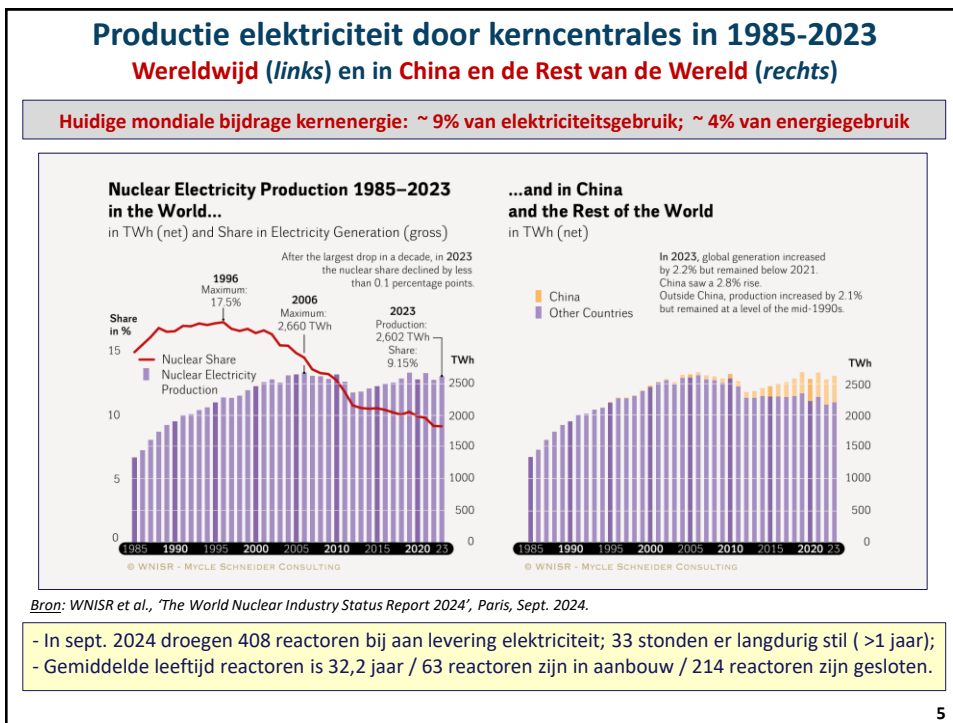


Bron: UCS, 2011

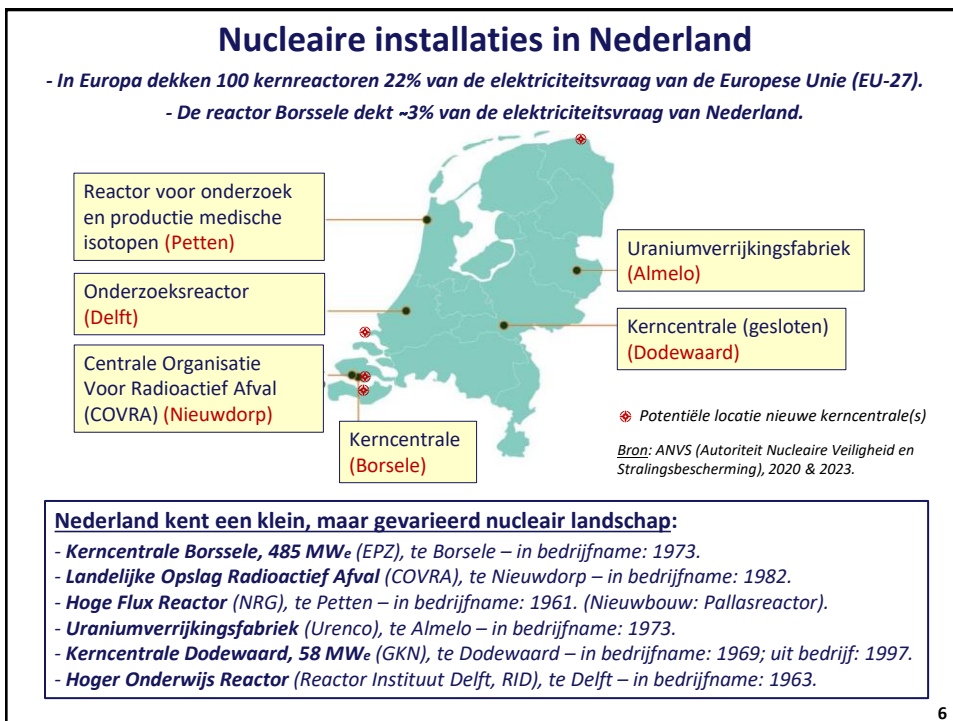
Door kernsplijting wordt in de kern van de drukwaterreactor warmte opgewekt en stoom geproduceerd. De stoom wordt gebruikt om een turbine aan te drijven. Deze is verbonden aan een stroomgenerator. Om een drukverschil over de turbine te krijgen wordt de stoom achter de turbine gekoeld en gecondenseerd. Het gecondenseerde water stroomt terug naar de reactor. Het warme koelwater wordt geloosd, bijvoorbeeld op een rivier of zee (energieverlies:

4

4



5



6

(1)
**Heeft Nederland kernenergie
 nodig om (netto) tot nul-uitstoot
 van broeikasgassen in
 in 2050 te komen?**

7

**Gebruik energiedragers in Nederland, in TWh per jaar
 - in 2020 en in 2050, in ronde getallen -**

Groei economie: 1,5%/jaar (excl. energiegebruik in 2050 voor negatieve emissie CO₂, bijv. DAC-CO₂)

| | 2020 | 2050 |
|---|--------------------------------------|--|
| Elektriciteitsgebruik Drenthe in 2020: ca 2,5 TWh | 110 TWh (≈ 400 PJ/jaar) | 300 TWh (excl. Hz-productie voor niet-elektriciteitsmarkt) |
| Finaal gebruik energiedragers incl. elektriciteit, excl. bunkers | 600 TWh (= 2.160 PJ/jaar) | 500-550 TWh |
| Primair gebruik energiedragers excl. bunkers Drenthe in 2020: ca 14 TWh | 830 TWh (≈ 3.000 PJ/jaar) | 700-750 TWh |
| Bunkers (energiegebruik internationaal vlieg- en scheepsverkeer) | 170 TWh (≈ 600 PJ/jaar) | 100-150 TWh |
| Totaal primair gebruik energiedragers incl. bunkers | 1000 TWh (= 3.600 PJ/jaar) | 800-900 TWh (Scenario's: van 630 tot 1.100 TWh/jaar) |

Minister van EZK (10 juni 2022): "In het toekomstige systeem zal Nederland, in de optiek van het kabinet, op jaarbasis tenminste voorzien in ongeveer zijn eigen directe elektriciteitsvraag, en daarnaast kunnen voorzien in een strategische hoeveelheid binnenlandse waterstofproductie."

8

8

Het aanbod van energiedragers in 2050 in Nederland

- Stel dat we voor 2050 **op zee 70-75 GW windvermogen** weten te realiseren, en **op land 8-10 GW windvermogen**. Stel ook dat we erin slagen om voor 2050 op daken, muren, gevels, land en water **125-150 GW zon-PV vermogen** te installeren.

- Met deze capaciteit zou jaarlijks ongeveer **450-500 TWh elektriciteit** kunnen worden opgewekt. Let op: een aanzienlijk deel van deze energie zal niet worden geproduceerd of gaat verloren door: (1) curtailment; (2) verliezen bij conversies; (3) verliezen bij transport en opslag van energie.

- De mogelijke bijdrage van **andere hernieuwbare energiebronnen** (geothermische energie, omgevingswarmte, aquathermische energie, zonnewarmte, organisch afval, restwarmte) lijkt voldoende om de vraag naar lage-temperatuur warmte in 2050 te dekken (≤ 100 TWh/jaar).

- De overheid streeft momenteel naar nul-gebruik van **fossiele brandstoffen** in 2050 (ook als er geen CO₂ wordt uitgestoten). Ook is besloten dat **houtige biomassa** niet meer gebruikt mag worden voor het opwekken van warmte of elektriciteit (ook niet in combinatie met CCS); het moet primair hoogwaardig - als grondstof - worden toegepast. Vraag: hoeveel in 2050? **140 TWh? 280 TWh?**

- **Import van waterstof** kan belangrijk worden. Op dit moment is niet bekend hoeveel import in 2050 realiseerbaar is (maar waarschijnlijk niet genoeg). Doelstelling voor **2030: 13-23 TWh**.

- De bouw van **2 grote kerncentrales (EPR's)** zou een elektriciteitsproductie van **25 TWh per jaar** mogelijk maken. Merk op dat er minstens **8 EPR's** nodig zijn om jaarlijks **100 TWh** te genereren.

PM: 5 SMR's van (gemiddeld) 25 MWe kunnen jaarlijks ca. 1 TWh elektriciteit leveren, plus warmte.

9

9

(11 februari 2011)

Nieuwbouw: randvoorwaarden van Nederlandse overheid (een selectie)

Ontwerp:

- Het ontwerp van de kerncentrale moet gebaseerd zijn op de laatste stand van de techniek. Dus een moderne (3^{de} generatie) reactor, zoals de franse EPR. Ook moet het *bewezen* technologie zijn.

Veiligheid:

- De kans op een kernsmeltongeval moet kleiner zijn dan één in 1 miljoen jaar.
- De omhulling (containment) moet van binnenuit bestand zijn tegen hoge overdruk, en van buitenaf tegen een ongeval met een verkeersvliegtuig.
- De beveiligingsmaatregelen van de nucleaire inrichtingen moeten zijn afgestemd op de meest actuele dreigingsbeelden, zoals op aanslag terroristen. [*Vraag sinds 'Ukraine': ook op oorlogshandelingen?*]

Dekking kosten:

- Het is aan marktpartijen om al dan of niet te investeren in kernenergie; de Rijksoverheid investeert zelf niet, maar stelt randvoorwaarden. [*NB: Eind 2021 werd besloten wél mee te investeren.*]
- De vergunninghouder van de kerncentrale is verantwoordelijk voor het dragen van de kosten van zowel het afvalbeheer als het treffen van een voorziening voor de opslag van het afval (tijdelijk bij de COVRA).
- Vanaf het moment dat de kern van een nieuwe kerncentrale voor het eerst beladen wordt met splijtstof, moeten de kosten voor de buitengebruikstelling en ontmanteling ('decommissioning') voor 100% gedekt zijn.

Expertise:

- Er moet voldoende expertise zijn, inclusief opleidingsmogelijkheden voor deskundigen. [*Nu: een tekort.*]

Bron: Ministerie van EL&I, 'Kernenergie', brief van de minister aan de Tweede Kamer, 11 feb. 2011

10

10

(2)

Het maatschappelijke debat over kernenergie

- *Is er voldoende uraan?*
- *Zijn kerncentrales veilig?*
- *Wat zijn de gevolgen van een groot ongeluk?*
 - *Wat doen we met het radioactieve afval?*
 - *Is kernenergie economisch aantrekkelijk?*

11

De voorraad natuurlijk uranium

Samenstelling natuurlijk uranium: 0,006% U-234 + 0,712% U-235 + 99,282% U-238.

U-235 is gemakkelijk splijtbaar, **U-238** heel moeilijk. Als U-238 een neutron invangt wordt het U-239, dan Neptunium-239, en dan **Plutonium-239**. **Pu-239** is gemakkelijk splijtbaar, net als U-235.

Natuurlijk uranium wordt gehaald uit uranium erts. Rijke ertsen kunnen een U-percentages hebben van 10-15%. Een meer gangbare concentratie van uraan in gewonnen erts is 0,1-0,5%.

Huidige schatting van de natuurlijk uranium reserves (= uraanvoorraden die *zeer waarschijnlijk economisch winbaar* zijn): **6-8 mln ton**. Dit is **-100 keer het huidige jaarlijkse gebruik**.

- **De ultiem winbare voorraad uranium:** wordt geschat op **10-30 mln ton**, misschien 100 mln ton.
- **Huidige mondiale gebruik** (veelal in LichtWaterReactoren): **-67.000 ton uranium per jaar**.

In 2021 werden de winbare reserves geschat op 6,1 mln tonnes (= 100%). **Per land:** Australië (28%), Kazachstan (13%), Canada (10%), Rusland (8%), Namibië (8%), Zuid-Afrika (5%), Nigeria (5%), etc.

Als we de splijtbare componenten uit het afval halen en benutten, kan uraan méér energie leveren.

Door het U-238 om te zetten in Pu-239, kan uit de U-reserves ca. 70 x meer energie worden gehaald.

Uranium kan ook uit zeewater worden gehaald. De totale voorraad U in zeewater is 4,5 miljard ton.
De concentratie van het uraan is minder dan 3×10^{-3} ppm.

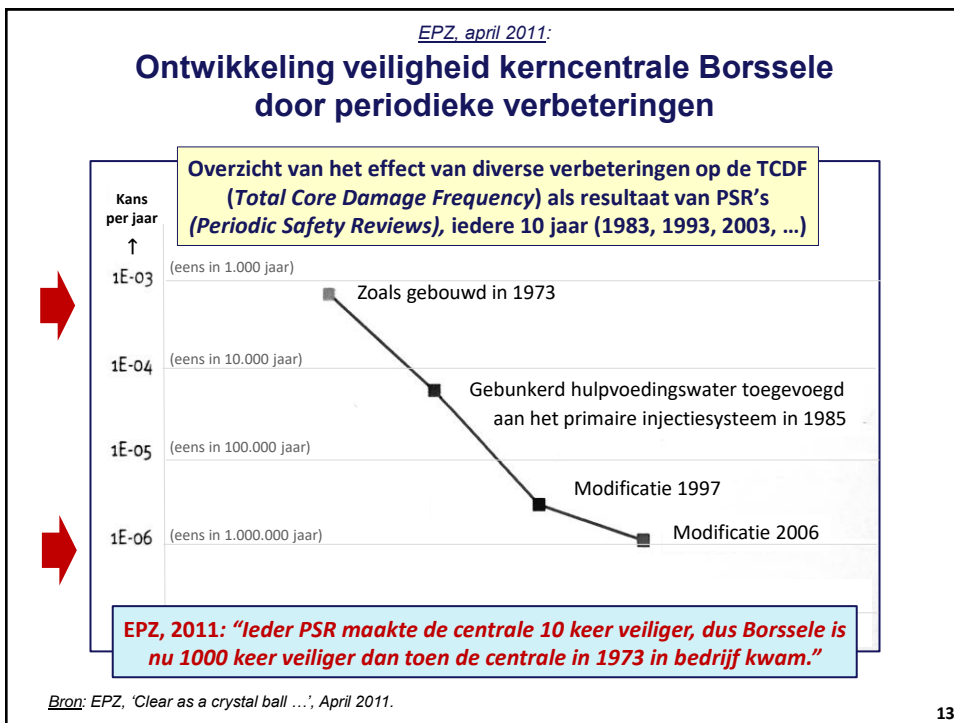
- Exploitatie van deze voorraad leidt tot hogere winningskosten. Maar, de kostprijs van uranium heeft een kleine invloed op de kWh-prijs van elektriciteit opgewekt met kernenergie.
- De milieueffecten van de winning van uranium uit zeewater vergen nader onderzoek.

PM: Inzet thorium is ook een optie (als grondstof voor het maken van splijtbaar U-233).

Bronnen: H.H. Rogner et al., 'Energy Resources and Potentials', GEA, 2012 // WNA, 'Uranium Mining Overview', aug. 2023.

12

12



13

Hoe dachten bezorgde wetenschappers in de jaren '70 over: De gevolgen van een groot kernongeluk

Reactor 4 van de kerncentrale in Tsjernobyl, 29 april 1986

Reactor 3 & 4 van kerncentrale Fukushima Daichi, 5 april 2011

Prof. dr. J.D. Fast (1980):

- "De kans op het uit elkaar barsten van een reactorvat en het daarop volgende doorbreken van de betonnen omhulling is volgens de Commissie Rasmussen (zie WASH-1400, 1975) en anderen zeer klein. De gevolgen zijn echter onvoorstelbaar groot."
- "Is een grote kernreactor enige tijd in gebruik, dan bevat hij meer radioactiviteit dan verscheidene duizenden Hiroshima-bommen kunnen produceren."
- "Zou deze hoeveelheid in een dichtbevolkt land als Nederland of België door een ongeluk als het veronderstelde plotseling vrijkomen, dan zouden honderdduizenden mensenlevens acuut verloren gaan. De overlevenden zouden op een sterke stijging van de kankersterfte en op erfelijke schade kunnen rekenen."
- "Een groot deel van het land zou bovendien voor vele jaren onbewoonbaar worden."

Bron: Prof. dr. J.D. Fast, 'Energie uit Atoomkernen', Natuur en Techniek, Maastricht, 1980, pag. 160.

Echter, de ongelukken in Tsjernobyl (1986) en Fukushima (2011) hebben beperkt of niet tot acute stralingsdoden geleid. Wél leidde het tot langdurige evacuatie uit een groot gebied.

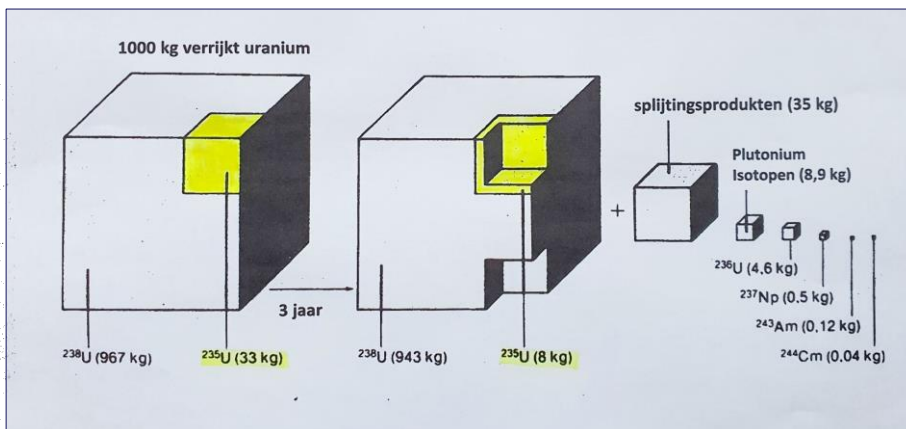
14

14

Samenstelling van de splijtstof na 3 jaar energieproductie

Veranderingen in de samenstelling van 1000 kg verrijkt uranium (3,3% U-235) na 3 jaar energieproductie in een PWR (Pressurized Water Reactor)

(Np = Neptunium, Am = Americium, Cm = Curium)



Bron: J.D. Fast, 'Energie uit atoomkernen', 1980

15

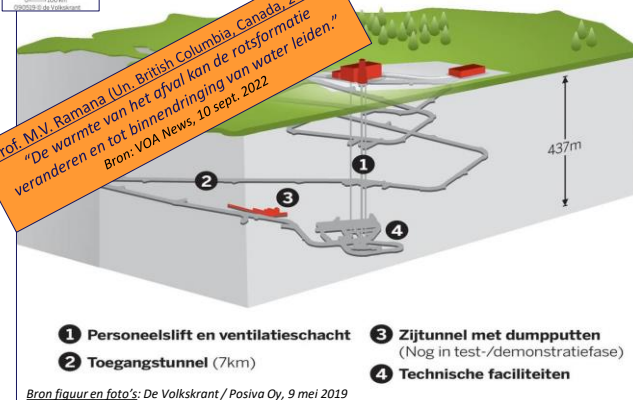
15

Definitieve opslag van kernafval ondergronds in Finland

Aanleg grottennetwerk in Onkalo, moet in 2025 klaar zijn.

Mogelijk wordt hier > 6,000 ton kernafval opgeslagen - in granieten ondergrond van 1,7 miljard jaar oud -

Prof. M.V. Ramana (Un. British Columbia, Canada, 2022):
 "De warmte van het afval kan de rotsformatie veranderen en tot binnendringing van water leiden."
 Bron: VOA News, 10 sept. 2022



Bron figuur en foto's: De Volkskrant / Posiva Oy, 9 mei 2019



De aanleg van een tunnelstelsel



De bouw van een testtunnel



Een put voor het opslaan van afval

- In Nederland wordt gedacht aan definitieve opslag in heel grote dikke klei- of zoutlagen.
 - Het kabinet heeft in de zomer van 2024 besloten met deze opslag NIET te wachten tot 2100 of 2130.

16

16

De economie van kernenergie: grote vraagstukken die spelen

1. Hoge investeringskosten kerncentrale

- De totale kosten van een nieuw te bouwen kerncentrale in Nederland zijn zeer hoog: € 8-12 miljard (1000 MWe centrale) resp. € 12,5-20 miljard (1650 MWe centrale) – in euro's van 2024.
- Kleine reactoren kosten minder geld maar zijn vooralsnog per kWe niet goedkoper. In het begin zijn de kosten per kWe juist hoger. Door modulering, seriebouw en zo mogelijk ook een radicaal ander ontwerp van de reactor kan dit veranderen.

2. Bedrijfstijd kerncentrale neemt vml. af bij steeds meer zon- en windvermogen

- De prioriteit in het beleid ligt thans bij het gebruik van hernieuwbare energie. In 2030 zou ca. 70% van onze stroom uit zon-PV en windturbines moeten komen. Daarna nog meer.
- Naast steeds meer zon-PV en windturbines heb je flexibel (back-up) vermogen nodig. Dit vermogen draait (onder het bestaande regime) dan niet in basislast. Die eenheden maken jaarlijks een steeds kleiner aantal draaiuren. Kerncentrales verdienen zich dan moeilijker terug. (Dan ook H₂-productie?)

3. Gemiddelde kWh-vergoeding wordt bij heel veel zon- en windvermogen lager

- Stroom uit zon en wind wordt steeds goedkoper. Daardoor zakt gemiddeld genomen ook de kWh-vergoeding die een kerncentrale krijgt. Kerncentrales verdienen zich hierdoor moeilijker of niet terug.

4. Dekking ontmantelingskosten kerncentrale

- De ontmantelingskosten moeten al betaald kunnen worden vóórdat de reactor wordt opgestart. Voor investeerders is dit een probleem.
- Vaak stelt men dat deze kosten gelijk zijn aan 15% van de constructiekosten. Maar bij 'Dodewaard' en 'Borssele' komen ze waarschijnlijk dicht in de buurt van de oorspronkelijke totale bouwkosten.

17

17

(3)
**Realisatie grote kerncentrales
 (1000-1600 MWe)**

18

Kerncentrales die voor nieuwbouw in aanmerking komen

| Ontwikkelaar / Leverancier | Naam (en type) | Vermogen | Waar in aanbouw of al gebouwd |
|----------------------------|--|---|--|
| Areva / EDF (Frankrijk) | EPR (PWR) | 1600-1630 MW _e <i>[of een kleiner ontwerp?]</i> | Finland, Frankrijk, China, UK |
| Westinghouse (USA) | AP1000 (PWR) | 1150-1250 MW _e | China, USA |
| KEPCO / KHNP (Zuid-Korea) | APR-1400 (PWR) <i>[of APR-1000]</i> | 1400 MW _e <i>[1000 MW_e*]</i> | Zuid-Korea, VAE <i>[afgeleide versie voor Europa]</i> |
| GE Hitachi (USA/Japan) | ABWR (BWR) | 1350-1460 MW _e | Japan, Taiwan |
| AECL (Canada) | ACR-1000 (PHWR) | 1165 MW _e | ACR-1000, "ontwerp is op de plank gezet" **) |

PWR = Pressurized Water Reactor; BWR = Boiling Water Reactor; PHWR = Pressurized Heavy Water Reactor

*) Sommige publicaties noemen 1200 MW_e, maar volgens de Stichting Kernvisie (website, nov. 2024) is het 1000 MW_e.

) In nov. 2023, onthulde het bedrijf Atkins Réalis ("we are the current original equipment manufacturer and steward of CANDU technology") een nieuw CANDU ontwerp aan: **CANDU Monark, een 1000 MW_e Generation III+ reactor.

19

19

17 juli 2024:

De regering van de Tsjechië geeft de voorkeur aan KHNP (Zuid-Korea) als leverancier van een nieuwe kerncentrale in Dukovany

- De regering van de Tsjechië heeft voorkeur voor **KHNP** (Korea Hydro & Nuclear Power Company) als aannemer voor de bouw van **twee APR-1000 reactoren** in Dukovany (ligt ~40 km van Brno).
- De prijs waarvoor KHNP levert ligt rond de € 8 miljard per eenheid, wat overeenkomt met **-€8,000 per kW_e ('overnight costs')**.
- Door twee units op één locatie te bouwen, daalden de kosten per unit met 20%.
- Er volgen nu onderhandelingen met KHNP over bouw van nog meer eenheden, en over betrokkenheid Tsjechische industrie.
- Het contract met KHNP zal Q1-2025 worden getekend.**
- De **bouwvergunning** is gepland tegen **2029**. De proefstart staat gepland voor eind 2036 en **commerciële exploitatie vanaf 2038**.
- Bij niet-naleven van het bouwschema gelden contractueel vastgestelde boetes.

Er wordt een combinatie van instrumenten toegepast om de economische levensvatbaarheid van het project te waarborgen en investeerders te beschermen tegen externe risico's:

- Een staatslening met een looptijd van 30 jaar;
- Geen rentebetaling voordat de centrale werkt;
- 1% rente boven de rente waartegen de staat de financiering heeft geleend na de start van de centrale;
- Bescherming investeerders tegen externe risico's;
- De elektriciteit wordt gedurende 40 jaar verhandeld tegen een vooraf vastgestelde kWh-prijs;
- Een vaste datum voor start en oplevering centrale;
- Alle geproduceerde elektriciteit wordt gekocht door de SPV, een juridische entiteit die voor 100% eigendom is van de staat en een vergunning heeft voor de handel in elektriciteit.
- De SPV verkoopt de elektriciteit op de groot-handelsmarkt, of aan een derde partij die namens de SPV de elektriciteit op de markt verkoopt.

Bronnen: Persbericht Tsjechische overheid, 17 juli 2024 // EU.LEX, 30 juni 2022 // World Nuclear Association, 23 juli 2024

20

20

Wanneer levert een nieuwe grote kerncentrale stroom aan het net ? (1)

- **Kabinet Rutte-IV** (dec. 2022): *'De realisatie van twee nieuwe kerncentrales kan rond 2035 rond zijn'*. En later (dec. 2023): *'De 1^{ste} draait naar verwachting in 2035, de 2^{de} in 2037'*.

- **Werkgroep CO₂-vrij elektriciteitssysteem 2035** (mei 2022): *'Eerste centrale kan ruim na 2035 in bedrijf komen'*.

- **Raad voor de leefomgeving en infrastructuur** (Rli, sept. 2022): *'Nieuwe kerncentrale levert op zijn vroegst elektriciteit in de periode 2035-2040'*.

Enkele ervaringen in andere Europese landen

- Tussen het politieke besluit om kerncentrales te bouwen en de (verwachte) voltooiing hiervan zit (ruim) 20 jaar in zowel *Finland*, *Frankrijk* als *Engeland* (en *VS*). In *China* en *VAE* ging het sneller.
- *Polen* besloot in 2005 kerncentrales te gaan bouwen. De eerste spade moet nog in de grond.
- In de *VAE* zijn recent 4 Zuid-Koreaanse kerncentrales gebouwd. Bouwtijd per centrale: 9 jaar.
- *Tsjechië*, dat voorloopt op Nederland, streeft bij de bouw van een in juli 2024 geselecteerde Zuid-Koreaanse kerncentrale van 1000 MWe naar levering van stroom aan het net in 2038.

Ervaring met voorgenomen bouw Pallas-reactor in Petten

- Sinds 2003 werkt NRG aan de bouw van een *nieuwe, kleine reactor in Petten (35 MW_{th})*. In 2012 besloot de overheid de voorbereiding financieel te steunen. Spade voor fundering in 2023 in de grond. Planning nu: bouw reactor start in 2025; productie medische isotopen vanaf 2031/32.

21

21

Wanneer levert een nieuwe grote kerncentrale stroom aan het net? (2)

Belangrijke hobbels / hindernissen voor nieuwbouw kerncentrales in Nederland:

- (01) beperkte nucleaire kennis in Nederland (aan verbetering wordt nu gewerkt).
- (02) groot te kort aan vaklieden, hier maar ook elders (bijv. in Frankrijk en UK).
- (03) wegvallen ondersteuning vanuit Duitsland door *'Atomusstieg'*.
- (04) geen ervaring meer met nieuwbouw kerncentrales (verbetert nu door Pallasproject).
- (05) weinig deskundigheid bij overheid (thans weer in opbouw).
- (06) het regelen van de betrokkenheid van de Staat bij nieuwbouw (nieuw Staatsbedrijf?)
- (07) het arrangeren van de financiering van de bouw (een nieuwe *'Kalkar-heffing'*?)
- (08) er is nauwelijks tot geen nucleaire industrie in ons land.
- (09) het vinden of creëren van een bedrijf dat de bouw daadwerkelijk wil en kan realiseren.
- (10) er is in Nederland geen grote bouwbedrijven meer dat risico-nemend wil participeren.
- (11) het vinden van banken of (pensioen)fondsen die de bouw (acceptabel) willen financieren.
- (12) welke fabrikant mag/gaat de kernreactor(en) leveren.
- (13) het verkrijgen van bouw- en inbedrijfstellingvergunningen.
- (14) de procedures die, met inspraak en burgerberaden, doorlopen moeten worden (3-5 jaar).
- (15) invloed onvoorziene gebeurtenissen (zie het afbreken van eerdere bouwplannen).
- (16) wettelijke bepalingen over het gegarandeerd kunnen betalen van de ontmantelingskosten.
- (17) hoogte investeringskosten, lengte bouwtijd, en competitie met andere energiebronnen.

Conclusie: een nieuwe kerncentrale zal vml. niet vóór 2040 stroom leveren aan het net.

22

22

(4) Perspectieven SMR's (*Small Modular Reactors*) voor Nederland

23

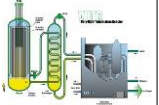
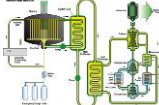

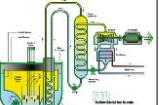
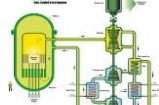
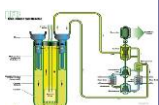
Innovatie: een nieuwe (4^{de}) generatie kernreactoren

Nu al meer dan 20 jaar geeft het 'Generation IV International Forum' (GIF) leiding aan gezamenlijke activiteiten om tot een nieuwe generatie kernenergiesystemen te komen (grote en kleine reactoren).

Generatie IV reactoren moeten:

- (1) Brandstof (splijtstof) efficiënter gebruiken;
- (2) Minder radioactief afval produceren;
- (3) Economisch concurrerend zijn;
- (4) Voldoen aan stringente eisen wat betreft 'veiligheid' en 'het tegengaan van proliferatie'.

GIF (initiatief van USA):
13 kernenergie-landen +
de Euratom (27 landen).

| | | | |
|--|---|---|--|
| <p>Very High Temperature Reactor (VHTR)</p>  | <p>Molten Salt Reactor (MSR)</p>  | <p>Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR)</p>  | <p>Zo'n 100 deskundigen evalueerden 130 reactorconcepten, waarna het GIF 6 technieken selecteerde voor verdere R&D:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zeer hoge temperatuur reactor (VHTR), - Gesmolten-zoutreactor (MSR), - Superkritische watergekoelde reactor (SCWR), - Natriumgekoelde snelle reactor (SFR), - Gasgekoelde snelle reactor (GFR), - Loodgekoelde snelle reactor (LFR). |
| <p>Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)</p>  | <p>Gas-cooled Fast Reactor (GFR)</p>  | <p>Lead-cooled Fast Reactor (LFR)</p>  | |

Gebaseerd op: GIF (website)

24

24

Innovatie: de ontwikkeling van kleinere reactoren (SMR's)

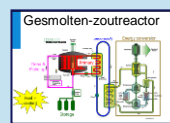
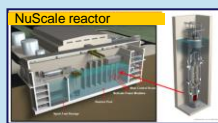
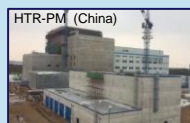
Micro: < 10 MWe. **Mini:** < 50 MWe. **Klein:** < 300 MWe. **Middelgroot:** 300-600/700 MWe.

Aantal ontwerpen voor kleinere reactoren is wereldwijd groot: meer dan 120 (!)

- Het gaat om Generatie-III of III+ technologie, maar ook om Generatie-IV.
- De totale investeringskosten van kleine reactoren zijn lager. De hoop van de ontwikkelaars is dat ze daardoor makkelijker verkocht kunnen worden. Maar: een *First-of-a-Kind reactor per kW duurder!*
- Door o.m. de modulaire opzet én door reactoren in veelvoud te produceren (seriebouw) verwacht men de bouwtijd te kunnen verkorten en de bouw- en constructiekosten te kunnen verlagen.
- Men denkt aan toepassing bij elektriciteitsproductie (bijv. vervanging kolencentrales), maar ook bij warmteproductie (industrie; gebouwde omgeving), bij waterstofproductie, et cetera.
- Aandacht nodig voor gehele splijtstofcyclus! (van winning splijtstof t/m berging radioactief afval).

Voorbeelden kleinere reactoren:

- (1) HTGR – Pebble Bed reactor (China); (2) Rolls-Royce reactor (UK); (3) NuScale reactor (USA); (4) BWRX-300 (USA); (5) U-battery (Urenco-UK); (6) Gesmolten-zoutreactoren (bijv. 'thorium-MSR').



Ref. o.a.: Antje Jordan & Wim Turkenburg, 'Literatuurstudie stand van zaken kernenergie', GS Prov. Zuid-Holland, april 2020; Wim Turkenburg, 'Hoe snel dragen nieuwe kleine kerncentrales (SMR's) commercieel bij aan de energievoorziening?', Milieu, juli 2024, pp. 46-52.

25

25

Provincie Overijssel (nov. 2024):

"Vier plekken geschikt voor kleine kernreactoren"

- Volgens de Gedeputeerde Staten van Overijssel is er in de provincie plaats voor **4 kleine kernreactoren**, "op plekken waar de energievraag hoog is".
- Overijssel streeft bij de energietransitie naar het realiseren van een *energiemix inclusief kernenergie*.
- De GS van Overijssel denken aan mini-SMR's met een capaciteit van max. 20 MWe.
- De GS denken dat de bijdrage van deze reactoren aan de energiemix van de provincie *maximaal zo'n 2,5%* zou kunnen zijn.
- De GS hebben nog *geen concrete locaties* op het oog, daarop wordt nog gestudeerd.
- GS: "Grootste probleem is dat ze nog niet bestaan".
- GS: "Vóór 2040 staan ze zeker niet in Overijssel!".

Bron: Tubantia, 12 nov. 2024

Voorbeelden van mini- en micro-SMR's die thans ontwikkeld worden:

- HTTR (Japan)..... 30 MWth
- Hermes (USA)..... 35 MWth
- MMR (USA)..... 10-50 MWth
- Project Pele (USA)..... 3-15 MWth
- Aurora Powerhouse (USA)..... 40 MWth
- eVinci microreactor (USA)..... 15 MWth
- PWR-20 (USA)..... 60 MWth
- HTGR-POLA (Polen)..... 30 MWth
- FLEX reactor (UK)..... 60 MWth
- BANR (USA)..... 50 MWth
- Calogena (Frankrijk)..... 30 MWth
- Jimmy SMR (Frankrijk)..... 10 MWth
- Energy Well (Tsjechië)..... 20 MWth
- MovelluX (Japan)..... 10 MWth

groen: gasgekoelde reactor
 blauw: gesmolten-zoutreactor
 rood: snelle-neutronenreactor
 geel: watergekoelde reactor
 zwart: anders

Bron: Wim Turkenburg, Tijdschrift Milieu, juli 2024

26

26

TNO & NRG.Pallas (15 nov. 2024):
“Er is in 2050 bij de industrie ruimte voor 2 tot meer dan 13 SMR's”

TNO & NRG.Pallas (15 nov. 2024):

- “SMR's kunnen door het leveren van proceswarmte (naast elektriciteit) een substantiële bijdrage leveren aan de CO₂-reductie van grootschalige industriële processen.”
- “Uit het onderzoek blijkt dat er in 2050 ruimte is voor **2 tot meer dan 13 SMR's met een gemiddeld vermogen van 150 MW_e (of: 250 MW_{th} + 90 MW_e).**”
- “Het berekende aantal is afhankelijk van de toekomstige industriële activiteit in Nederland, en de warmtevraag van bijvoorbeeld raffinaderijen en fabrieken voor de productie van chemicaliën.”
- Hierbij is een aanname: De ‘overnight’ bouwkosten van een SMR zijn €7.100/kW_e in 2030, €6.600/kW_e in 2040 en €6.100/kW_e in 2050. Voor een grote centrale is de aanname: ‘Overnight Costs’ steeds €7.100/kW_e.
- Ook aangenomen: bedrijfstijd SMR = 8.320 vollast-uur per jaar (CF=95%), en discontovoet = 2,25%. Daarnaast: groei economie tot 2050 = 1,5% per jaar.



Impressie van een kleine modulaire reactor.
Bron: NRG PALLAS, nov. 2024

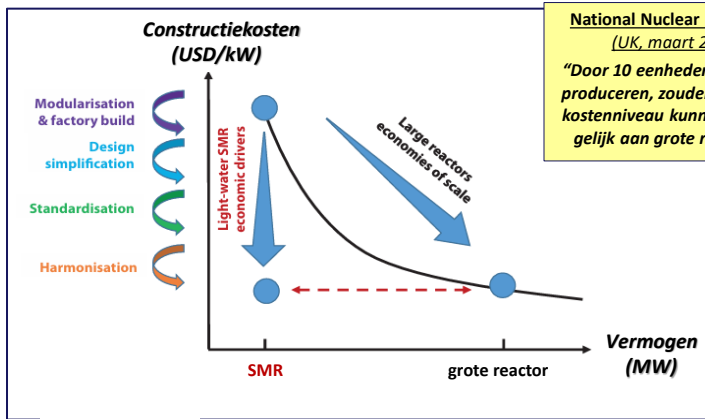
In Nederland is de energie-intensieve industrie geclusterd in 5 gebieden:

- Zeeland - West-Brabant
- Rotterdam - Moerdijk
- Noordzeekanaal (A'dam-IJmuiden)
- Noord-Nederland
- Chemelot (Limburg)

Bron: <https://www.tno.nl/nl/newsroom/2024/11/kleine-kernreactoren-rol-energiesysteem>

27

Belangrijke economische factoren om schaalnadelen van SMR's te compenseren



National Nuclear Laboratory (UK, maart 2016):
 “Door 10 eenheden per jaar te produceren, zouden SMR's een kostenniveau kunnen bereiken gelijk aan grote reactoren.”

- Economies of scale heeft historisch gezien tot een toename van de grootte van kernreactoren geleid. SMR's volgen een andere aanpak, gebaseerd op *economies of multiples* (resp. *seriebouw*).
- Vereenvoudiging van het ontwerp, modularisatie, standaardisatie en harmonisatie in combinatie met *serieproductie in een fabriek* zijn het nieuwe economische paradigma van SMR's.

Bron: NEA-OECD, 'The NEA SMR Dashboard, second edition', feb. 2024.

28

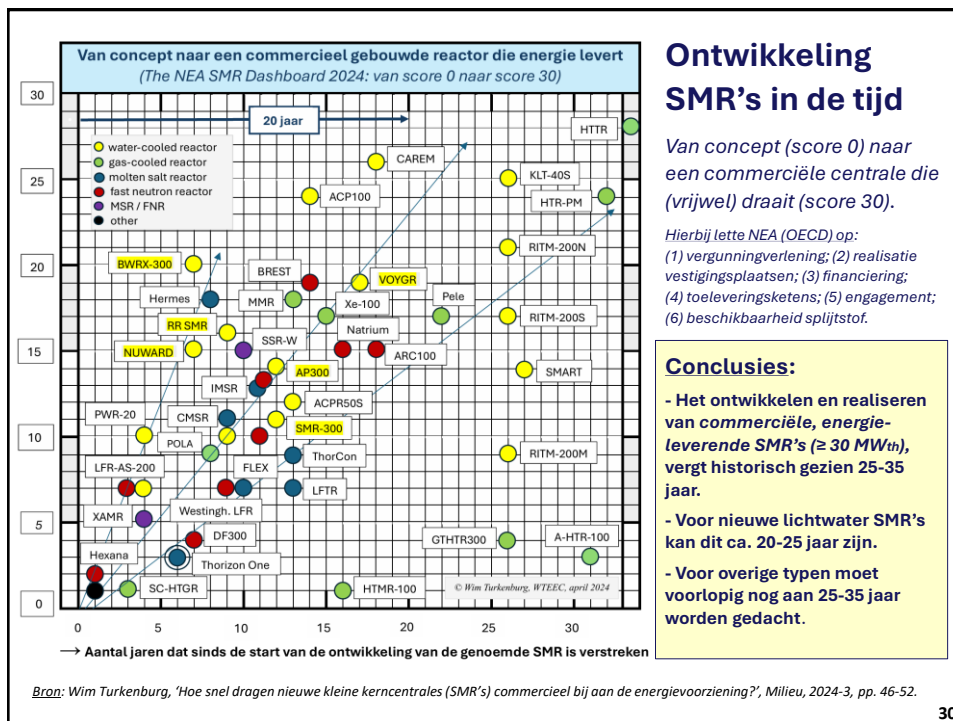
15 Voorbeelden van mogelijke *Small Modular Reactors*

| Naam | Vermogen | Type | Status | Ontwikkelaar |
|---------------|--|--------------|---------------------|----------------------------|
| HTTR | 30 MW _{th} | HTR | In bedrijf (test) | JAEA, Japan |
| KLT-40S | 2 x 35 MW _e | Twin PWR | In bedrijf (demo) | OKBM, Russia |
| HTR-PM | 2 x 105 MW _e | Twin HTR | In bedrijf (demo) | Inet et al., China |
| CAREM-25 | 27 MW _e | Integral PWR | In aanbouw | CNEA & INVAP, Argentina |
| VOYGR | 77 MW _e | Integral PWR | Dichtbij realisatie | Nuscale Power, USA |
| SMR-160 | 160 MW _e | PWR | Dichtbij realisatie | Holtec et al. , USA |
| SMART | 100 MW _e | Integral PWR | Dichtbij realisatie | KAERI, South-Korea |
| BWRX-300 | 300 MW _e | BWR | Dichtbij realisatie | GE Hitachi, USA |
| UK SMR | 470 MW _e | PWR | Dichtbij realisatie | Rolls-Royce SMR, UK |
| Nuward NP-300 | 2 x 170 MW _e | Twin PWR | In ontwikkeling | CEA et al., France |
| Natrium | 245 MW _e | Sodium FNR | In ontwikkeling | TerraPower et al., USA |
| Integral MSR | 192 MW _e | MSR | In ontwikkeling | Terrestrial Energy, Canada |
| Moltex-MSR | 300 MW _e | MSR | In ontwikkeling | Moltex, UK/Canada |
| Xe-100 | 80 MW _e | HTR | In ontwikkeling | X-energy, USA |
| Xe-mobile | 1-5 MW _e | HTR | In ontwikkeling | X-energy, USA |
| U-battery | 10 MW _{th} /4 MW _e | HTR | Gestopt in 2023 | Urenco-UK et al., UK |

Bron: gebaseerd op o.a. WNA, 'Small Nuclear Power Reactors', jan. 2023 & NEA, 'The NEA SMR Dashboard, 2024 edition', feb. 2024 .

29

29



30

World Nuclear News, 2 October 2023

UK SMR selectiewedstrijd: 6 bedrijven naar volgende fase

(1) EDF, (2) GE Hitachi Nuclear Energy International LLC, (3) Holtec Britain Limited, (4) NuScale Power, (5) Rolls Royce SMR, (6) Westinghouse Electric Company UK Limited zijn uitgenodigd om in de volgende fase van het selectieproces te bieden op een Brits overheidscontract.

- Deze bedrijven werden beoordeeld "het meest in staat te zijn om **rond 2035** een werkende SMR's te leveren".
- Het doel van de Britse regering is om een **definitieve investeringsbeslissing ('FID')** te nemen in **2029**.
- De ambitie is om in **lente 2024*** aan te kondigen welke van de zes bedrijven steun van de overheid krijgen.



Holtec (SMR-300)



Rolls-Royce (RR SMR)



Westinghouse (AP300 SMR)



Nuward (NUWARD SMR)



GE Hitachi (BWRX-300)



Nuscale (VOYGR SMR)

*) GBN, 11 nov. 2024: "dit wordt lente 2025"

Great British Nuclear (GBN):
(11 nov. 2024)

"Alle vier de leveranciers op de shortlist zijn haalbare opties voor verdere ontwikkeling."

De onderhandelingen met de 4 bedrijven zijn op 11 november begonnen, voorafgaand aan de indiening van definitieve aanbestedingen.

Een definitief besluit over steun wordt nu lente 2025 verwacht.

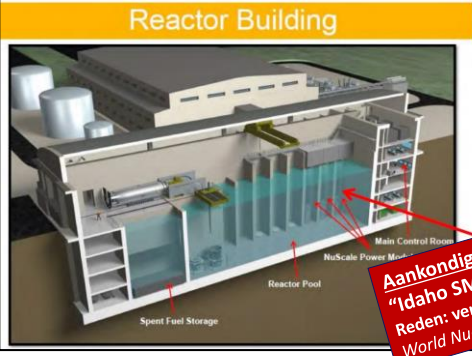
Bron: WNN, 12 Nov. 2024

Bron: world-nuclear-news.org/Articles/UK%C2%A0SMR-selection-contest-Six-companies-into-next

31

Eén type SMR in ontwikkeling

PWR van NuScale (USA): modules van 77 MW_e (eerder: 50-60 MW_e)



Reactor Building

Nuclear Power Plant in Idaho

Planning: 462 MW_e (6 modules)

Constructie is niet begonnen.

Verwachte kWh-kosten:

- In 2015: \$58 per MWh
- In 2023: \$89-\$119 per MWh

Aankondiging in nov. 2023:
"Idaho SMR project beëindigd"
Reden: verdere stijging van de kosten
World Nuclear News, 9 nov. 2023

- NuScale is een jong bedrijf, opgericht in 2007.
- In Idaho werd gewerkt aan de realisatie in 2029 van de eerste centrale. Eerste vergunningen waren binnen.
- **Verwachte OC-bouwkosten** in 2015: ~\$5,000/kW_e.
- **Verwachte totale kosten** in nov. 2020: \$8,500/kW_e. In jan. 2023 meldde Nuscale: ~\$19,000/kW_e.

Nuscale & UAMPS (nov. 2023): "Prijnsindex van de afgelopen 2 jaar heeft de kosten doen stijgen:

- Gefabriceerde stalen plaat, met 54%
- Leidingen van koolstofstaal, met 106%
- Elektrische apparatuur, met 25%
- Gefabriceerd constructiestaal, met 70%
- Koperdraad en kabel, met 32%."

Bronnen: Meldingen van NuScale, 2019-2023; WNN, 2023.11.09; E&E News, 2023.11.09; Utah Tax. Ass., 2020.08.04; Deseret News, 2020.09.01; Science Magazine, 2020.11.04; Utility Dive, 2022.11.16; E&E News, 2023.11.09; IEEFA, 2023.11.11; Power Magazine, 2024.01.08.

32

Kosten warmtevoorzieningssystemen: investeringskosten

Enkele technieken voor het opwekken van warmte t.b.v. warmtenetten (nu of later):

- Biowarmtecentrale (biomassaketel; verbranding houtsnippers)
- Aquathermie (warmte uit oppervlakte- of rioolwater)
- Ondiepe geothermie (aardwarmte van diepte minder dan 500 meter)
- Diepe geothermie (aardwarmte van diepte tussen 500 en 4000 meter)
- Kernenergie (warmte uit een mini-kerncentrale, bijv. de U-battery)

Geschatte investeringskosten (excl. warmtenet):

- Biomassaketel (vermogen: 15 MW_{th})*: 440 Euro per kW_{th}
- Aquathermie (vermogen: 0,88 MW_{th})*: 720 Euro per kW_{th}
- Ondiepe geothermie (vermogen: 3,4 MW_{th})*: 1.200 Euro per kW_{th}
- Diepe geothermie (vermogen: 14 MW_{th})*: 1.800 Euro per kW_{th}
- Kernenergie, de U-battery (vermogen: 10 MW_{th})**: 4.400-7.700 Euro per kW_{th}

Opn.: De Pallasreactor alleen (35 MW_{th}), die in Petten moet gaan komen, zou per kW_{th} ongeveer 30.000 Euro kunnen gaan kosten (mededeling directeur Pallas, BNR, 12 dec. 2020).

Bronnen: *) PBL, 2019 **) Urenco-UK, 2020

33

33

IEA, juni 2022:

“Een grotere rol voor kernenergie vereist een grotere daling van de bouwkosten van kerncentrales”

- **Algemeen:** “De industrie moet projecten op tijd en binnen het budget opleveren om haar rol te kunnen vervullen. Dit betekent dat tegen 2030 nucleaire projecten in geavanceerde economieën voltooid moeten zijn voor ongeveer **5000 dollar/kW**, vergeleken met gerapporteerde kapitaal-kosten van ongeveer **9000 dollar/kW (exclusief financieringskosten)** voor unieke projecten.”
- **Elektriciteit:** “Waar er mogelijkheden zijn om alternatieven toe te passen - zoals waterkracht, bio-energie- en fossiele-brandstofcentrales met CCS - zouden de bouwkosten van kernenergie moeten dalen tot **2000-3000 dollar/kW** (in dollars van 2020) om concurrerend te blijven.”
- **Waterstof:** “Het gebruik van elektriciteit uit kernenergie om waterstof en warmte te produceren biedt nieuwe kansen. Volgens de kostenprognoses van de NZE (Net Zero Emission studie) is waterstofproductie via aardgas met CCS of via elektrolyse met behulp van hernieuwbare energiebronnen de goedkoopste opties. Als kernenergie wil kunnen concurreren met deze alternatieven, moeten de investeringskosten dalen tot **1000-2000 dollar/kW**.”
- **Warmte:** “Er zijn ook mogelijkheden om warmte uit kerncentrales - via warmtekrachtkoppeling (WKK) - te gebruiken voor stadsverwarming en ander warmtegebruik bij hoge temperaturen, hoewel de potentiële omvang van deze markt beperkt is. De bouwkosten zouden moeten dalen tot **2000-3000 dollar/kW** om het concurrerend te maken.”

Bron: IEA, 'Nuclear Power and Secure Energy Transitions', juni 2022

34

34

Vraagstukken die aandacht behoeven bij onderzoek potenties SMR's (naast de 'overnight costs' en de totale bouwkosten)

- **Het aantal medewerkers dat nodig is voor het bedrijven, onderhouden, controleren en beveiligen van de SMR:** Volgens de Technopolis-studie 'De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector - nu en verwachtingen voor 2030/2035' (sept. 2022) heb je bij centrales kleiner dan 200 MWe altijd zo'n 100 medewerkers nodig. Bij een SMR van 20 MWe veroorzaakt alleen dit al een kWh-prijs van ca. 5 cent. *Kan dit anders?*
- **De hoeveelheid en samenstelling van het radioactief afval dat de betreffende SMR produceert:** Veel SMR's hebben een ander type splijtstof nodig dan wat grote lichtwaterreactoren gebruiken. Zo hebben kleine lichtwater SMR's uranium nodig met een hogere verrijkingsgraad (tot soms bijna 20%). Dat geeft een andere samenstelling van het splijtingsafval. Kleine SMR's veroorzaken ook meer geactiveerd materiaal. Gesmolten-zoutreactoren geven weer minder lang-levende isotopen (transuranen). *Het radioactief afval dat een SMR produceert behoeft dus aandacht.*
- **De ontmantelingskosten van een SMR:** Deze kosten worden vaak op minder dan 15% van de constructiekosten ('overnight costs') begroot, dus op €750-1.500 per kWe bij constructie kosten van €5.000-10.000 per kWe. De praktijk laat echter zien dat bij kleine reactoren deze kosten veel hoger kunnen zijn. Bij de Dodewaard centrale worden deze kosten nu geschat op €4.300-5.700 per kWe. Voor kleine reactoren kost(te) het elders (bijv. USA, Noorwegen) soms nog veel meer. *Dit behoeft al bij de ontwikkeling van de SMR aandacht.*
- **De kosten en beschikbaarheid van de benodigde splijtstof:** Dit is voor mini- en micro-SMR's en voor Advanced Modular Reactors (Generatie-IV SMR's) een serieus vraagstuk.

35

35

Wanneer draaien de eerste (mini-)SMR's in Nederland?

Nuclear-21 et al. (juli 2022): "In ideale omstandigheden kunnen mini-SMR's vanaf eind jaren 2020, doch zeker vanaf 2030, een regionaal regelbaar vermogen aanbieden in de Provincie Limburg."

Bron: Nuclear-21, DNV, Stork & Evocati Consulting Alliance, "Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg", juli 2022.

Over deze uitspraak was ik verbaasd:

- SMR's zijn nog in de fase van Research, Development & Demonstration en nog niet commercieel op de markt te koop. Ook is in de USA de 'waakhond' NRC pas met één ontwerp akkoord gegaan.
- In de Westerse wereld wordt verwacht (o.m. door de IEA) dat de eerste commerciële SMR's energie gaan leveren in ~2035, misschien wat eerder. Dit gebeurt waarschijnlijk in Canada, USA en/of de UK. Daarna komen deze SMR's – indien concurrerend – mondiaal op de markt.
- In Nederland zullen commercieel opererende bedrijven waarschijnlijk afwachten hoe deze SMR's functioneren en hoeveel ze kosten, voordat wordt besloten een SMR te bouwen. Een *Final Investment Decision (FID)* over de bouw van een SMR wordt dan niet voor 2035 genomen.
- Verder analyse en onderzoek, het verkrijgen van vergunningen, de FID, het verder voorbereiden van de bouw, etc. en vervolgens de bouw van de (LWR) SMR kan in totaal 10-18 jaar in beslag nemen. [Op de lange termijn, bij de N-de reactor, kan dit 6-8 jaar worden, 'mits aan alle randvoorwaarden is voldaan' – zie slide 22].
- **Mijn inschatting: een commerciële SMR zal dan in NL niet voor 2045 operationeel zijn.**
- **Ministerie van EZK (nu: KGG) denkt aan ~2040.**

36

36

Bedankt voor uw aandacht

Wim Turkenburg

wim_turkenburg@hotmail.com

37

37

Appendix: kort CV Prof. Dr Wim C. Turkenburg



Enkele huidige functies en activiteiten:

- Emeritus hoogleraar 'Science, Technology & Society', Universiteit Utrecht
- Consultant op het gebied van energie- en milieuvraagstukken (WTEEC, Amsterdam)
- Voorzitter bestuur International Energy Initiative (IEI), Princeton, USA.
- Contactpersoon NOS en BNR op het gebied van kernenergie en energie-en-klimaat.

Opleiding:

- Studeerde Experimentele Natuurkunde (Universiteit Leiden en Universiteit van A'dam).
- Deed als promovendus onderzoek bij het FOM Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica (AMOLF) te Amsterdam.
- Promoveerde in 1976 te A'dam (UvA) tot doctor in de Wiskunde en Natuurwetenschappen.

Enkele vroegere functies en activiteiten:

- Lid Algemene Energieraad (AER), VROM-raad, Energiecommissie SER, Programma Cie Energieonderzoek NWO.
- Bijzonder Hoogleraar Leefmilieu aan de Vrije Universiteit Brussel (VUB, 1992-1993).
- Lead Author (LA) bij het 'Second Assessment Report on Climate Change' van het IPCC (SAR-IPCC, 1993-1995).
- Voorzitter Energiecommissie van de VN (UN-CENRD, 1999-2002).
- Wetenschappelijk directeur van het Utrecht Centrum voor Energieonderzoek (UCE, Utrecht, 2000-2005).
- Directeur van het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling (Universiteit Utrecht, 2001-2011).
- Lid Raad van Toezicht ECN en NRG (2001-2010).
- Initiator, voorzitter en lid bestuur Onderzoeksprogramma CO₂ Afvang, Transport en Opslag (CATO, 2004-2010).
- Mede-initiator en bestuurslid World Energy Assessment (WEA, 2000) en Global Energy Assessment (GEA, 2012).
- Hoofdauteur van het hoofdstuk 'Hernieuwbare energie' van WEA-2000 en GEA-2012.
- Lid Stuurgroep / Begeleidingscie Stresstest Kerncentrale Borssele resp. Onderzoeklocatie Petten (2011-2012).
- Voorzitter van Review Commissies 'Radioactive Waste Management Programme' van NRG (Petten, 2011-2015).
- Lid Adviescommissie 'Organisatie en Financiering Pallas' (Den Haag, 2012-2013).
- Lid RvT van de Stichting Voorbereiding Pallasreactor (Alkmaar, 2014-2022) en van NRG (Petten, 2020-2022).
- Lid programmaraad TKI-BBE, Topconsortium voor Kennis en Innovatie 'Biobased Economy' (RVO, 2016-2022).

38