

Kernenergie, het lelijke eendje van de energievoorziening

Jan Goudriaan

jangouds@gmail.com

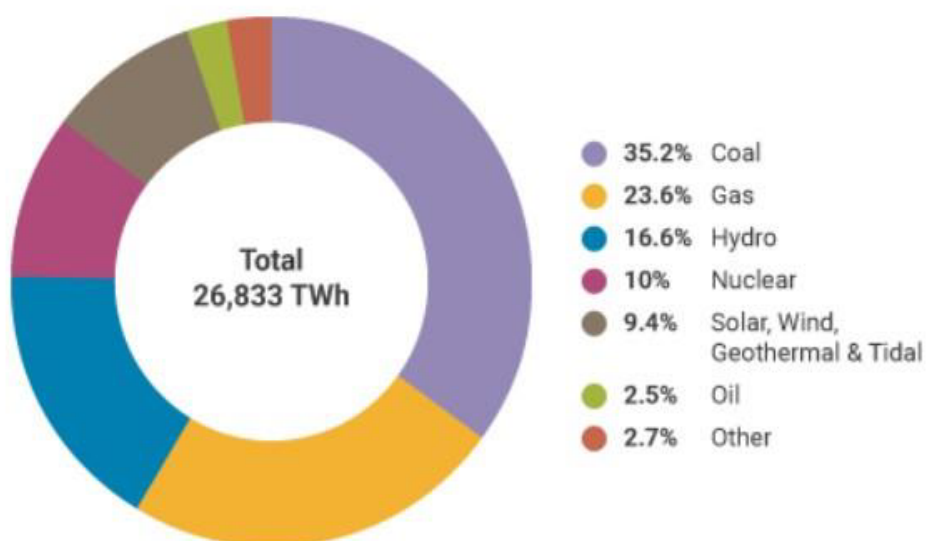
NWG, 14 november 2023

Mijn dank aan het bestuur van het NWG om mij uit te nodigen om over dit onderwerp te spreken. Mijn standpunt is duidelijk pro-kernenergie en misschien zal ik ééndimensionaal overkomen maar ik wil benadrukken dat onze maatschappij complex is en dat niet alles met kernenergie opgelost zal kunnen worden. Het is wel zo dat ruimtelijke ordening en energievoorziening zonder kernenergie veel lastiger en duurder zal worden.

Wat is mijn achtergrond? Ik ben in 1970 in Delft afgestudeerd in de Technische Natuurkunde, specialisatie akoestiek en daarna in dienst gekomen in Wageningen bij de toenmalige vakgroep Theoretische Teeltkunde van C.T. de Wit, later bij Rudy Rabbinge. Ik ben gepromoveerd in de micrometeorologie en ik heb onderzoek gedaan aan de CO₂ effecten op fotosynthese en transpiratie van gewassen. Van daaruit ben ik geïnteresseerd geraakt in de mondiale koolstofcyclus. Het circulatiemodel dat ik daarvoor heb gemaakt blijkt tot op de huidige dag de atmosferische CO₂ concentratie goed te berekenen. Dat model is ook gebruikt voor het advies aan de parlementaire commissie Middelkoop midden jaren '90. Kernenergie was destijds onbespreekbaar, mede omdat Tsjernobyl nog vers in het geheugen lag. In de decennia daarna heeft de

zogenaamde groene energie uit biomassa, windmolens en zonnepanelen een grote vlucht genomen. Velen vestigen hun hoop daarop en wijzen kernenergie nog steeds af.

Wat zijn de bezwaren? Milieudefensie bijvoorbeeld vindt kernenergie te duur, te laat, te gevaarlijk, ook vanwege het afval. Kernenergie zou ten koste gaan van zon en wind en niet nodig zijn. Deze bezwaren worden door vrijwel alle milieuorganisaties en politieke partijen ter linkerkant gedeeld, mijns inziens een betreutswaardige vergissing. Juist de zogenaamd duurzame energiebronnen leggen een enorm beslag op natuur en milieu, dit in tegenstelling tot kernenergie. We kijken nu eerst naar de elektriciteitsvoorziening wereldwijd en daarna naar de energievoorziening in Nederland.

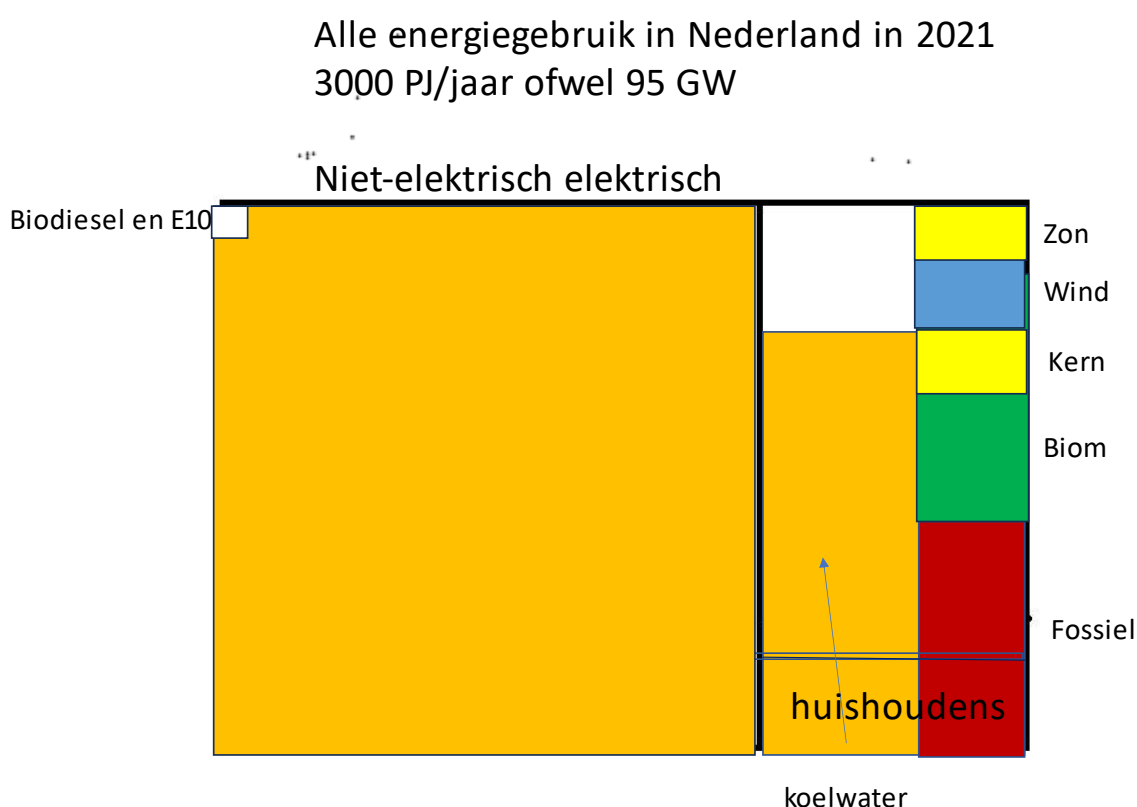


Source: IEA

Figure 2: World electricity production by source 2020 (source: International Energy Agency)

Wereldwijd leverden zon en wind in 2020 samen ongeveer 10 % van alle elektriciteit, en kernenergie ook. In Nederland is de verhouding schever, zon en wind samen wel 24 % tegenover een schamele 3,5 % voor kernenergie. Zon en wind dragen dus een behoorlijk steentje bij maar hoeveel kan het nog meer worden? In Trouw, 24 oktober 2023, schrijft Koos Schwartz onder de titel “Fenomenale groei van duurzame energiebronnen. Maar het groeitempo moet

nog hoger” over World Energy Outlook van IEA. Zoals gezegd leverden zon en wind samen 10% in 2020, maar dat zal volgens deze studie in 2030 50 % worden! Wauw, dan zal het aandeel fossiele energie wel behoorlijk zakken, zou je denken. Dat valt tegen, Trouw schrijft dat het gedaald zal zijn van 80% naar 73% ! Dat schiet natuurlijk niet op. Je kunt op je vingers natellen dat zelfs bij 100% groene stroom het aandeel fossiele energie nog steeds veel meer dan 50% zal zijn. Waarom is het zo moeilijk om dit percentage te verhogen? Twee fundamentele problemen, ten eerste de sterke wisselvalligheid van zon en wind, en ten tweede het feit dat opwekking van elektriciteit maar een klein deel van de totale energiebehoefte is, ongeveer 1/3. Eerst over het totale plaatje van energie:



In deze dia zien we de totale energiebehoefte van Nederland. Ruwweg 2/3 is nodig voor niet-elektrisch gebruik zoals proceswarmte, ruimteverwarming, transport, en dit grootste deel wordt opgewekt met bronnen die CO₂ produceren, in lichtbruin aangegeven. Een klein deel hiervan wordt gedekt door bijmenging met biobrandstof in diesel en benzine, momenteel 30 miljoen HBE's, ofwel 30 PJ, ofwel 1%, dat staat linksboven in wit. Het andere deel, 1/3 van de energiebehoefte wordt gebruikt voor de opwekking van elektriciteit. Het grootste deel van de

energie die een elektriciteitscentrale gebruikt gaat verloren aan koeling, in de dia in lichtbruin aangegeven. De elektriciteit zelf staat rechts, opgesplitst naar de bron ervan. Daarvan wordt volgens de Warmtemonitor van TNO, opgesteld door onze oud-student Reinoud Segers, in warmtenetten ongeveer 30 PJ, dus 1% van de totale energiebehoefte, nuttig gebruikt als restwarmte.

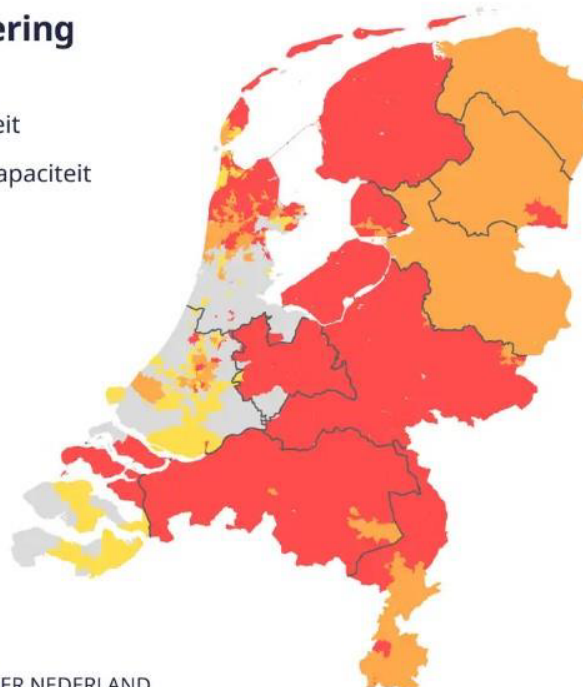
Hoeveel energie wekken we nu eigenlijk duurzaam op? Het officiële getal is nu, in 2023, 15% van de totale energiebehoefte (zie rechtsboven). De helft van die opwekking bestaat uit verbranding van biomassa. Ik hoop dat ik in dit gezelschap niet hoeft uit te leggen dat biomassa helemaal niet duurzaam is. Biomassa is wel de slechtste bron van energie die je je kan voorstellen. Als kerncentrales zogenaamd te laat komen, dan komt de hergroei van de gekapte bossen zeker te laat. De andere helft van de duurzame energie komt uit zon en wind, samen 8 % van de totale energiebehoefte. In de dia kun je ook zien dat huishoudens ongeveer 1/5 deel van de totale elektriciteitsbehoefte uitmaken, die op zijn beurt 1/3 deel van het geheel is. Dat betekent dat het huishoudelijk elektriciteitsgebruik goed is voor niet meer dan 1/15^{de} deel van de totale Nederlandse energiebehoefte. Het is mooi als je met je zonnepanelen nul op de meter hebt, maar het is een illusie dat je dan je energiegebruik dekt want indirect gebruik je veel en veel meer in de vorm van diensten en spullen. Je kunt zon en wind het beste beschouwen als de vrijwilligers van de elektriciteitsvoorziening die komen en gaan wanneer ze willen. Een enkele vrijwilliger is handig maar als ze allemaal tegelijk komen, lopen ze elkaar in de weg. Ik heb zelf zonnepanelen op mijn dak en ik wek daarmee 1300 kWh per jaar op, net genoeg voor mijn eigen stroombehoefte. Gemiddeld betekent dat 150 W, maar het maximum was op 3 juni rond het middaguur zo'n 1600 W, meer dan 10 maal zo veel! Voor één huis is dat geen probleem, maar de zon schijnt op alle panelen en zonneweides tegelijk. Je kunt op je vingers natellen dat dat niet goed gaat.

kunnen deze provincies last van stroomuitval krijgen. In de rode gebieden op de kaart hieronder is het terugleveren van schone energie problematisch. Er kan dus niet zomaar een zonnepark worden begonnen.

Aanvraag levering energie

- Beperkte capaciteit
- Voorlopig geen capaciteit
- Geen capaciteit

Opslag 1 dag elektriciteit eist
5,5 miljoen Tesla's of
450 duizend Battery Mobile
containers van Alfen.com

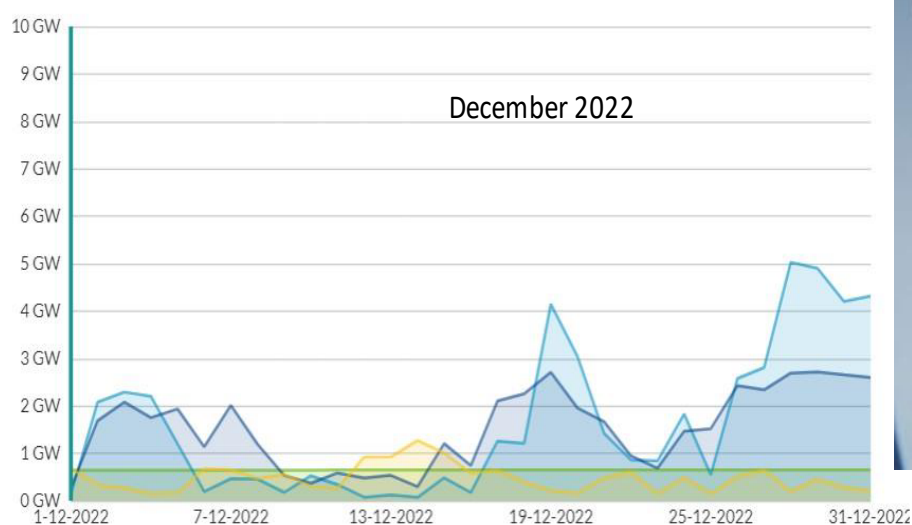


NU.NL, BRON: NETBEHEER NEDERLAND

En inderdaad, het is nu al zo dat het elektriciteitsnet begint vol te lopen. Afgelopen donderdag 9 november in De Gelderlander: 77 nieuwe appartementen in Nijmegen kunnen niet worden aangesloten. Dat komt door het eerste fundamentele probleem dat ik genoemd heb, de wisselvalligheid. De grote piekstromen eisen dikkere stroomkabels, en je wil de stroom die je in die korte tijd kan opvangen, natuurlijk ook bewaren, anders gezegd opslaan. Vaak wordt gesuggereerd om elektriciteit om te zetten in waterstof of warmte, stroom importeren of opslag in batterijen. Misschien zou dat laatste nog kunnen voor het dag/nacht ritme, je hebt 5,5 miljoen Tesla's nodig om één dag stroom op te slaan of 450 duizend containers The Battery Mobile van Alfen.com. Ik denk niet dat al die Tesla bezitters hun auto willen laten staan om de stroom terug te laten leveren. Tennet is dan ook pessimistisch. Een berichtje van 5 november. Netbeheerder TenneT zegt dat het niet loont om te investeren in energieopslag. Ze mikken liever op inzetten van flexibel vermogen, daarvan is er in 2030 tussen de 8 en 9 gigawatt nodig. Flexibel vermogen is een eufemisme, het kan bijvoorbeeld komen uit flexibel elektriciteitsverbruik van grote verbruikers. Die passen hun stroomverbruik aan

op het elektriciteitsaanbod. Dat kan natuurlijk niet zonder financiële compensatie die uiteindelijk door de consument moet worden betaald.

Elektriciteit uit zon en wind volgens Energieopweknl



In de winter zijn er soms langdurige periodes zonder zon en wind, Dunkelflaute in het Duits, zoals hier rond 13 december 2022. Zou je één of twee weken een beroep kunnen op flexibel vermogen? Shell weet wel dat dit niet kan en gaat daarom liever in energie uit wind en zon dan in kernenergie. Kernenergie ondermijnt de business case van Shell. Een kerncentrale kan als het nodig is vrijwel onbeperkt continu vol vermogen leveren. Natuurlijk is er af en toe onderhoud nodig, en elk jaar moet ¼ van de brandstof worden ververs, maar je kunt 90% bedrijfstijd wel halen.

Kernenergie is klimaatneutraal

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE ,Wenen 2021
Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options:

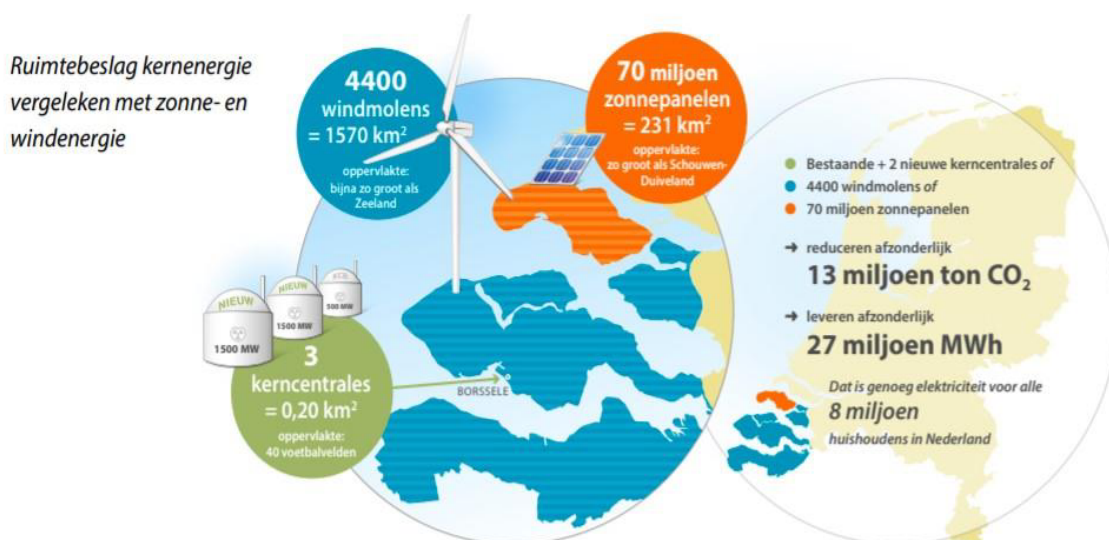
Broeikasgasemissie

Steenkool ~ 1000 g CO₂eq/kWh

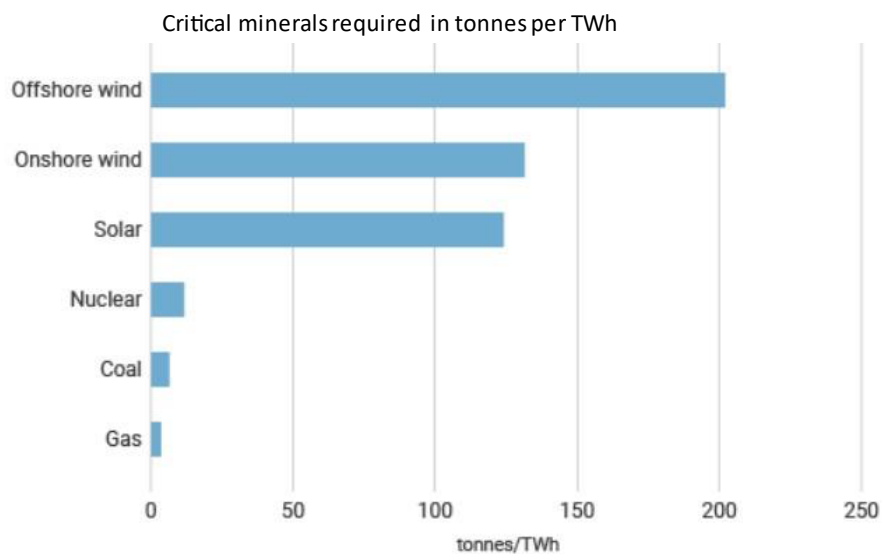
Aardgas ~ 450 g CO₂eq/kWh

KE, zon en wind ~ 10 g CO₂eq/kWh

KE is, net als zon en wind klimaatneutraal. Toch werd kernenergie bij de planning van de RES door Ed Nijpels buitengesloten van de klimaattafels. Wat waren zoal de bezwaren? Op de site van Milieudefensie is terug te vinden wat de gebruikelijke bezwaren zijn. Kernenergie is eng, het straalt, het is gevaarlijk, er is te veel levensgevaarlijk afval, de centrales kunnen de snelle wisselingen van zon en wind niet bijhouden, het is duur, de bouw duurt te lang, er is geen commerciële partij die er aan wil beginnen, we komen te laat. Laten we eens kijken wat hiervan klopt.

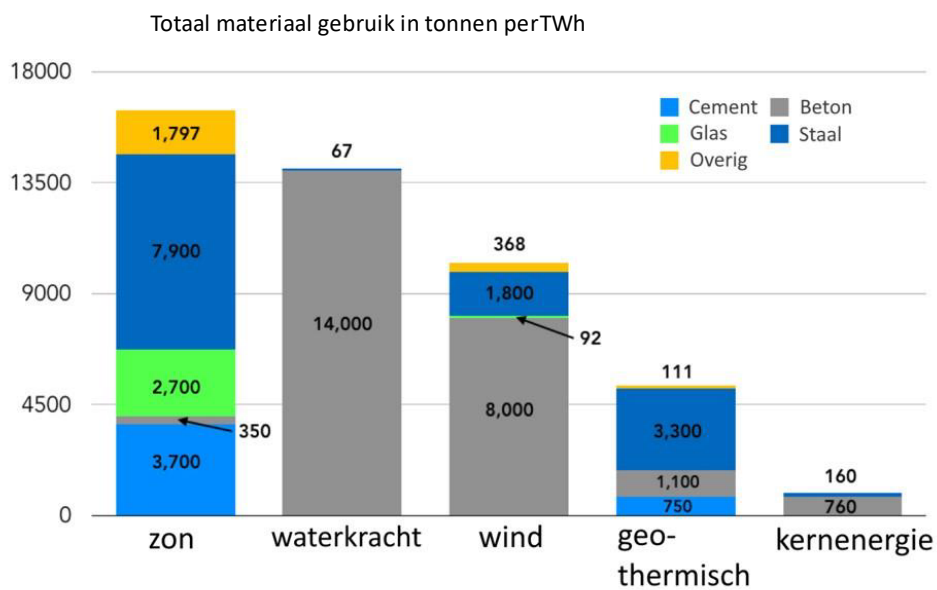


KE heeft heel weinig ruimte nodig, minder dan 1/1000^{ste} van zon of wind(<https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>). 3 kerncentrales in Borssele op 0,2 km² wekken evenveel stroom op als windmolens op 1570 km² of zonnepanelen op 231 km².



<https://www.worldnuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/mineralrequirements-for-electricity-generation.aspx>

9



Bron: EnvironmentalProgress.com op basis van Quadrennial Technology Review 2015, Tabel 10.4

10

KE vraagt relatief weinig materiaalgebruik per kWh, zowel in kritische mineralen als in het totale materiaalgebruik.

Détail de la facture du 10/11/2023 N°31976714055



Votre contrat Electricité

"Tarif Bleu" - 12 kVA - Option Base - Compteur communicant n°04197615178603

			Prix €HT/mois	Montant €HT	TVA
Abonnement					
Base - 12kVA - du 08/11/23 au 07/01/24			15,28	30,56	5,5%
Total Abonnement (dont acheminement 23,90 €)				30,56	
	Relevé début	Relevé fin	Conso kWh	Prix €HT/kWh	Montant €HT
Consommation					
Base - 12kVA - du 08/09/23 au 07/11/23	4663 (Enedis)	4905 (Enedis)	242	0,1887	45,67
Total Consommation (dont acheminement 3,23 €)				45,67	20,0%
			Conso kWh	Prix €HT/ kWh	Montant €HT
Taxes et Contributions					
Contribution au Service Public d'Electricité (CSPE)			242	0,00100	0,24
Contribution Tarifaire d'Acheminement Electricité (CTA)					5,24
Total Taxes et Contributions				5,48	20,0%
Total Electricité hors TVA				81,71	5,5%

En conclusion

Total facture hors TVA du 10/11/2023	81,71 €	Montant total 92,86 € TTC
TVA 20,00 % sur un montant total de 45,91 €	9,18 €	
TVA 5,50 % sur un montant total de 35,80 €	1,97 €	
Total facture TTC du 10/11/2023	92,86 €	

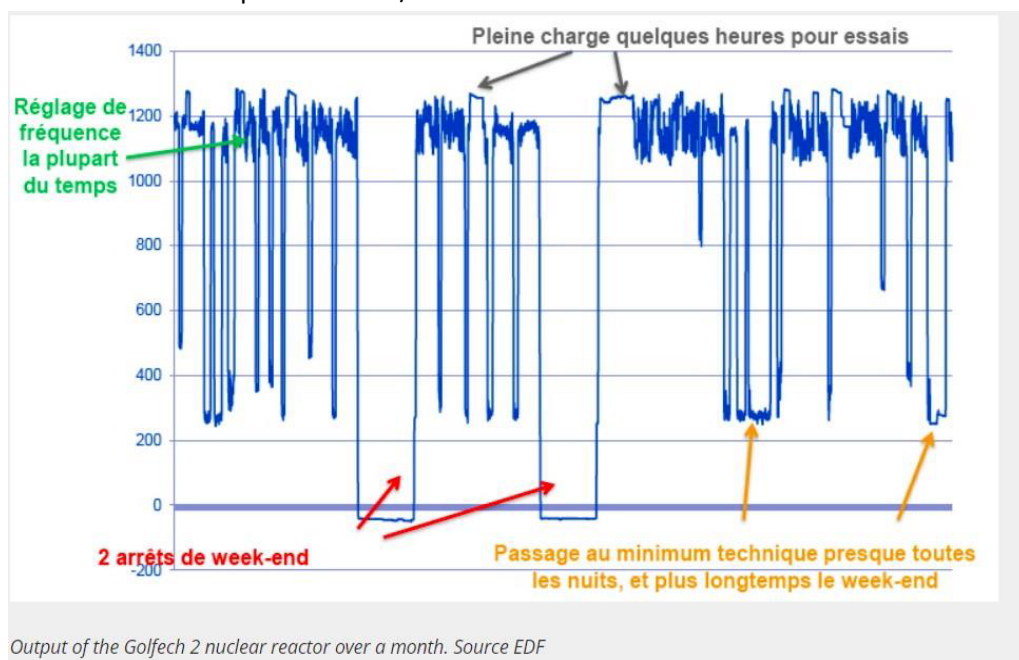
KE is goedkoop. Ik heb zojuist de factuur ontvangen voor het elektriciteitsgebruik van ons Franse huis, nog geen 19 ct per kWh. In Nederland betaal ik 38 ct, dus het dubbele.

Het is een vaak gehoorde misvatting dat kernenergie heel duur is. Daarbij wordt vaak verwezen naar berekeningen van de LCOE (levelized costs of electricity). In deze methode worden de totale kosten over de hele levensduur van de bron gedeeld door de totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit. Je krijgt dan dus de gemiddelde kosten uitgedrukt in €/MWh. Op het eerste gezicht lijkt dat een rationele manier van berekenen. Er is echter een groot bezwaar dat meestal niet wordt genoemd. Wikipedia zegt over de gangbare methode van de berekening van LCOE: *"In particular, if the costs of matching [grid energy storage](#) are not included in projects for [variable renewable energy](#) sources such as [solar](#) and [wind](#), they may produce electricity when it is not needed in the grid without storage."* Daarom worden berekende kosten van zon en wind met deze methode onderschat en wel des te sterker naarmate de penetratie van zon- en windenergie toeneemt. We zien nu al dat er in de zomer bij helder weer midden op de dag te veel elektriciteit wordt geproduceerd. Volgens contract krijgen de windmolenboeren dan toch betaald voor de stroom die ze geproduceerd hadden kunnen hebben (zie FTM,10

september 2022). Of stroom-intensieve fabrieken schroeven terug tegen een compensatievergoeding(zie RTL nieuws 20 mei 2022). Daar gaat de goedkope elektriciteit!

In de toekomst zal de mismatch alleen nog maar groeien. Als we wel rekening houden met de zelf concurrentie van zon met zon en wind met wind, zoals in de studie “Road to EU Climate Neutrality by 2050” is gedaan, blijkt dat kernenergie goedkoper is dan zon- en windenergie, 35 €/MWh voor nucleair tegenover respectievelijk 72, 47 en 59 €/MWh voor zon, wind op land en wind op zee. Dat betekent tussen de 45 en 90 miljard € per jaar voor het landelijke stroomgebruik. En dan zijn de aanvullende kosten van netverzwaring en batterijen nog niet eens meegerekend, want die horen niet bij de productiekosten. Net vorige week schreef FTM : *“ Klimaatminister Rob Jetten meldde deze week dat de kosten voor die aansluiting €40 mrd duurder uitvallen dan nog maar een jaar geleden werd gedacht. Voor de 21 gigawatt die staat gepland voor 2031 moet de overheid via Tennet nu €90 mrd uittrekken in plaats van €50 mrd. “*

<https://jancovici.com/en/energytransition/renewables/100-renewable-electricity-at-no-extra-cost-a-piece-of-cake/>



KE kan snelle wisselingen in de stroomvraag naar behoefte volgen. Het is waar

dat je een kerncentrale niet beneden 30% van zijn nominale vermogen moet laten zakken, maar daarboven zijn snelle wisselingen geen probleem.

<https://jancovici.com/en/energy-transition/renewables/100-renewable-electricity-at-no-extra-cost-a-piece-of-cake/>

KE gebruikt weinig brandstof en geeft dus ook heel weinig afval.

Uit <https://www.euronuclear.org/glossary/fuel-comparison/> :

1 kg natuurlijk uranium levert na verrijking 45000 kWh elektriciteit, Daar heb je 10000 kg olie of 12000 kg kolen voor nodig

Borssele produceert per jaar 3 m³ hoog radioactief afval.

Dit getal is in overeenstemming met 24 ton verrijkt uranium per jaar voor een 1000 MW-e centrale die 8 TWh/jaar produceert.

Hierbij komt 200 ton verarmd uranium per jaar vrij en is in het voortraject in open mijnbouw 10000 ton gruis geproduceerd. Overigens gebeurt de mijnbouw steeds meer door middel van “in situ leaching”.

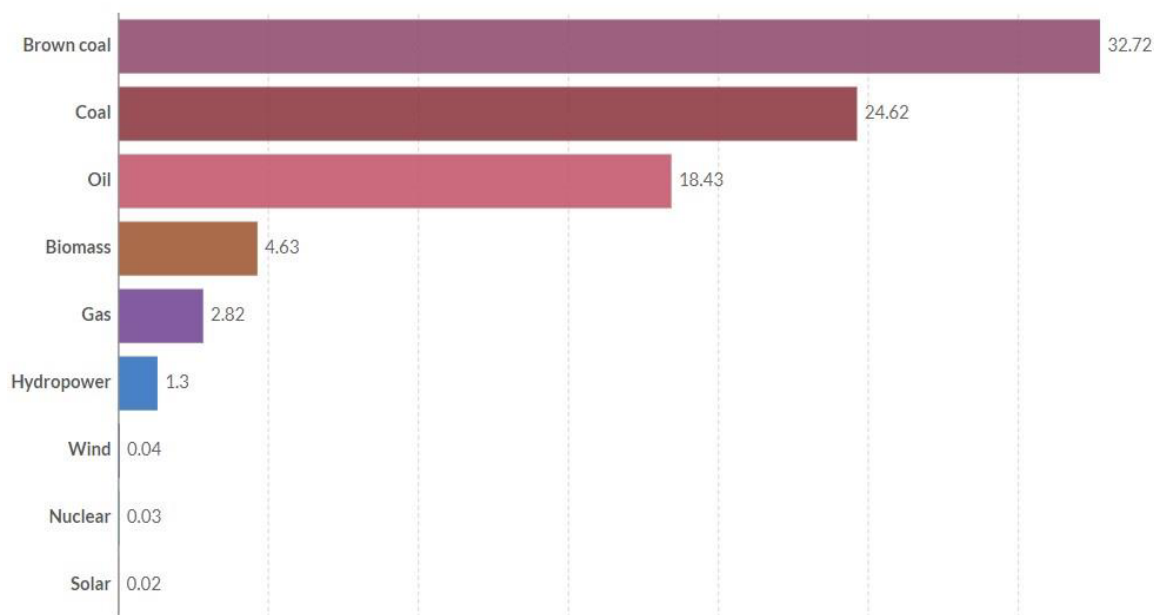
Volgens veel tegenstanders van KE zou het te laat komen. Redden we het wel met zon en wind? Om de klimaatdoelen van 2030 te halen, zouden we per dag 3 windmolens en 60 duizend zonnepanelen moeten installeren, schrijft Maarten van Andel in zijn boek “Kieswijzer Klimaat”. Overigens, ook na de verkiezingen van 22 november blijft dit boek actueel. Uit de snelheid waarmee Frankrijk zijn kerncentrales heeft weten te bouwen blijkt dat KE sneller de benodigde MWh kan leveren dan zon en wind. Met kernenergie kan het veel sneller. (zie ook “Kernenergie als kans” van Rauli Partanen en Janne Korhonen).

NuScale levert SMR's voor Ohio en Pennsylvania die volgens de offerte in 2029 klaar zullen zijn.

Het is een kromme redenering om KE tegen te houden met het argument dat het zogenaamd “te laat” zou komen. Natuurlijk hadden we er wel eerder mee moeten beginnen maar de mensheid zal na 2050 ook nog energie nodig hebben.

Death rates per unit of electricity production

Death rates are measured based on deaths from accidents and air pollution per terawatt-hour (TWh) of electricity.



Source: Markandya & Wilkinson (2007); Sovacool et al. (2016); UNSCEAR (2008; & 2018)
OurWorldInData.org/energy • CC BY

14

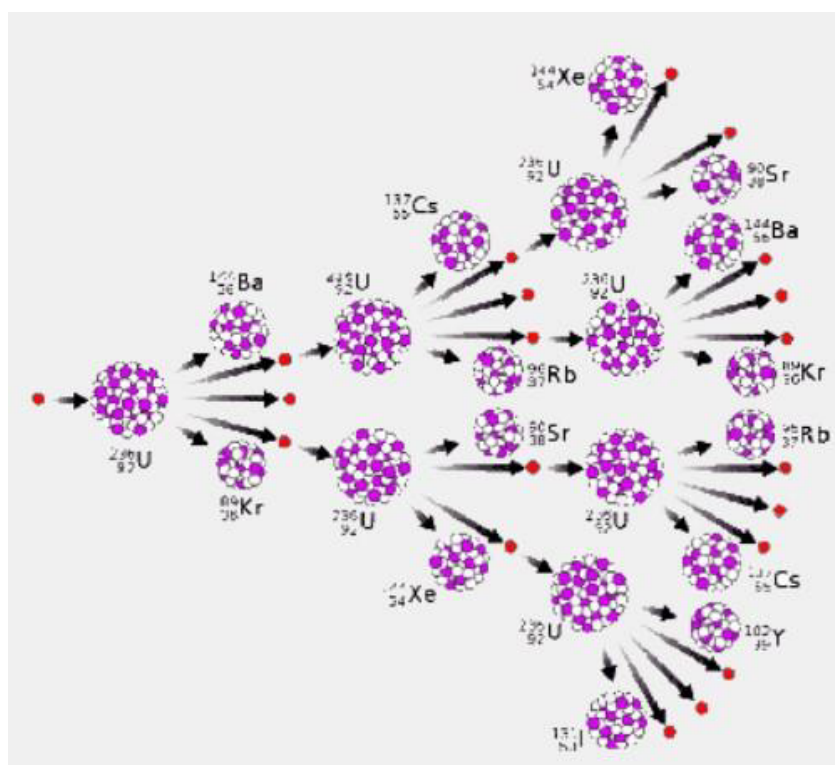
KE is veilig. Deze dia toont dat de opwekking van kernenergie net zo veilig is als die uit zon en wind. De enige echte rampen met een kerncentrale waren die bij Tsjernobyl en Fukushima. Over Three Mile Island(1979) was wel veel ophef over maar de buitenwereld heeft er nauwelijks schade van ondervonden. De reactorkern was wel deels gesmolten maar is het vat intact gebleven. De ontsnapte radioactiviteit heeft nauwelijks gevaar opgeleverd. Er zijn radioactieve edelgassen Krypton 85 en Xenon. Deze edelgassen precipiteren niet zoals Cesium of Strontium dat wel doen en verwaaien dus snel. Niemand is gewond of gedood en bij de omwonenden is geen toename van kanker geconstateerd. De gesmolten kern is 0,7 m in de betonnen vloer van 7,6 m dikte gezakt.

Er is geen industrie waarvan de kleinste incidenten zo goed worden gerapporteerd als in de nucleaire industrie. Het onbedoelde gevolg is een beeldvorming van voortdurende bijna-rampen en ongelukken. Het heeft geleid tot diepgewortelde angst die decennia lang is opgeblazen door Greenpeace en aanverwante organisaties als WISE en Laka. Het is deze angst die ten grondslag ligt aan de “Atomausstieg” van Merkel met België in haar voetsporen. Deze angst heeft indirect ontelbare doden veroorzaakt door te verhinderen dat fossiele brandstoffen werden vervangen door de veel veiliger kernenergie.

Maar,,, je kunt dit allemaal wel zeggen “maar als het misgaat, gaat het ook goed mis”, hoor ik dan. “Half Nederland wordt voor eeuwen onbewoonbaar!” Dat is onzin. De onbewoonbaar verklaarde zones rond Tsjernobyl en Fukushima

hebben een straal van 30 km. Dat is natuurlijk niet de omvang van half Nederland. Onbewoonbaar verklaard wil nog niet zeggen dat het echt onbewoonbaar is. In de verboden zones floreert de wilde natuur. De ramp bij Tsjernobyl was het gevolg van een onverantwoord experiment bij een gevaarlijk type centrale dat niet meer wordt gebruikt. Bij de moderne centrales is een ramp als die bij Tsjernobyl of in Fukushima onmogelijk, zoals ik later zal uitleggen.

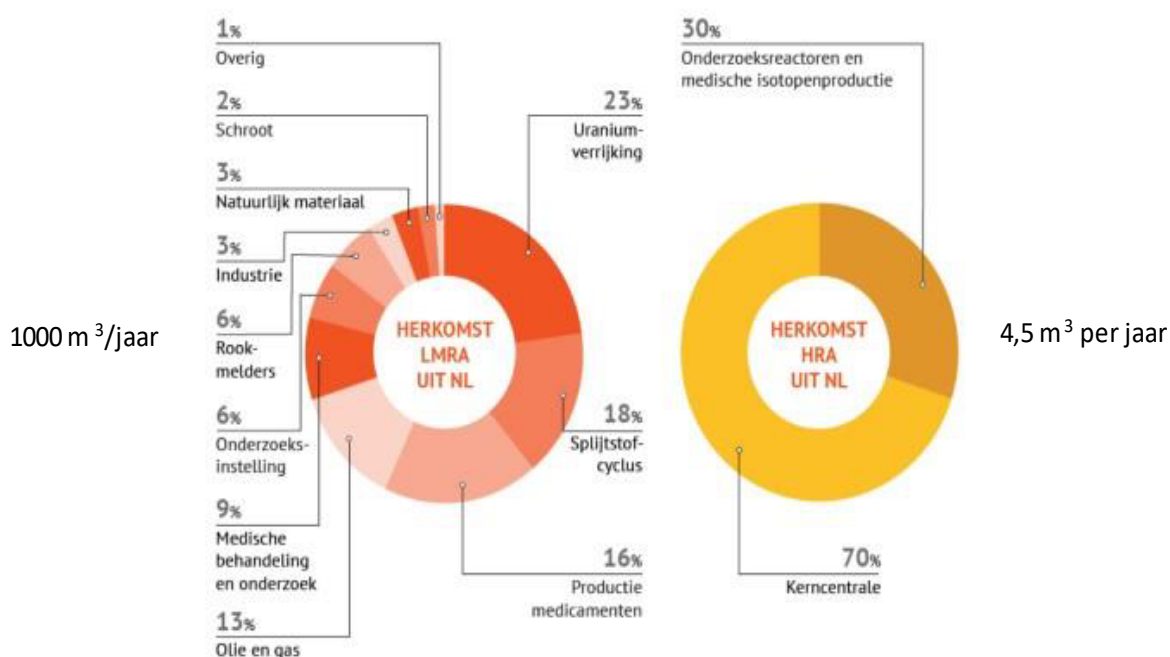
Dan wil ik nu overgaan op de meer technische uitleg van kernenergie.



Het splijtingsproces werd in 1938 in Berlijn ontdekt door Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner.

Deze illustratie van de kettingreactie van de kernsplijting zal bij de meesten van u wel bekend zijn. In de atoomkern zitten de positief geladen protonen heel dicht op elkaar en stoten elkaar met enorme kracht af. Ze worden bijeengehouden door de sterke kernkrachten, waarbij de neutronen onmisbaar zijn. Om het eenvoudig te houden kun je de sterke kernkracht vergelijken met klittenband. Een rondvliegend neutron kan een atoomkern tot trilling brengen waardoor de klittenband het niet meer houdt en de kern uiteenvalt in twee kleinere atoomkernen plus twee of drie neutronen die met grote snelheid

wegschieten. Per splijting komt er zo'n 200 MeV vrij, grotendeels in de twee fragmenten. De energie per neutron is ongeveer 1 MeV, bij een snelheid van 14000 km/s. Vergelijk dat eens met chemische energie. De verbrandingsenergie van steenkool is 35 MJ/kg, uitgedrukt per atoom is dat maar 4 eV. (Voor de biologen: 1 eV is equivalent met 3,3 ATP). Er zit een factor miljoen tussen chemische en nucleaire energie! Dat komt doordat de atoomkern zo ontzettend klein is, de interne krachten in de kern zijn daardoor enorm. Uiteindelijk blijkt dat uranium ruim 2 miljoen keer meer energie per gewicht bevat dan steenkool. Daardoor kan een kerncentrale gemakkelijk een jaar lang stroom leveren zonder bijgevuld te hoeven worden. De kerncentrale in Borssele produceert per jaar rond de 1000 ton radioactief afval, maar voor dezelfde elektriciteitsproductie geeft een kolencentrale op antraciet 20 miljoen ton as, dat is twintigduizend keer meer! 1 kWh geeft 7 g as uit antraciet en 44 g as uit bruinkool. Per eenheid opgewekte energie heeft kernenergie de laagste materiaalbehoefte en de kleinste oppervlaktevraag van alle energiebronnen en is daarmee de groenste energiebron.



Herkomst van radioactief afval in Nederland: LMRA is laag- en middelradioactief afval, HRA is hoogradioactief afval.

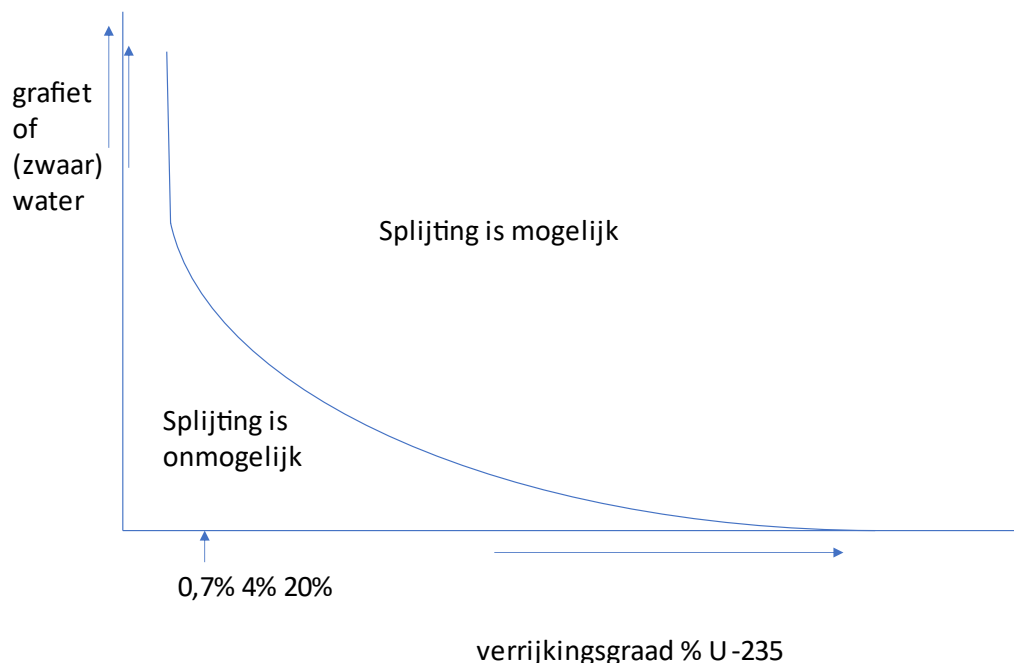
Dat zien we terug in de geringe hoeveelheid radioactief afval die bij COVRA in Borssele wordt opgeslagen. Het hoog radioactief afval, rechts aangegeven, is

4,5 m³ per jaar, waarvan 2/3 uit Borssele zelf en 1/3 uit Petten en Delft. Als alle elektriciteit in Nederland uit kernenergie zou komen, zou er per jaar 40 m³ HLW worden geproduceerd. Van het laag en midden radioactief afval komt maar 18% uit de splijtstofcyclus. Het merendeel komt uit andere activiteiten, vooral uit de medische hoek.

Terug naar de kettingreactie. Om te kunnen splijten moet een uraniumkern worden getroffen door een neutron. Bij de splijting komen ook twee of drie neutronen vrij die op hun beurt weer een andere kern kunnen doen splijten. Hierdoor kan een kettingreactie op gang komen, maar dan moeten er wel netto genoeg neutronen overblijven. Er mogen er niet teveel naar buiten schieten. Het is net als met hooibroei, dat treedt alleen op als de berg hooi groot genoeg is. Hetzelfde geldt voor de splijtingsreactie in een bijeengebrachte hoeveelheid uranium. Wanneer die hoeveelheid te klein is ontsnappen teveel neutronen naar buiten om de kettingreactie op gang te kunnen houden. In 1938 hadden de Duitsers kernsplijting ontdekt en vrij spoedig realiseerde men zich de militaire toepassingsmogelijkheden. Men had ook ontdekt dat alleen uranium-235 splijtbaar is en uranium-238 niet. Helaas bevat natuurlijk uranium slechts 0,7% uranium-235. Door dit lage gehalte is het lastig om een kettingreactie in gang te krijgen in natuurlijk uranium.

Dat komt mede doordat de wegschietende neutronen zo snel gaan (14000 km/s) dat de kans om splijting te veroorzaken heel klein is. De neutronen zijn de uraniumkernen voorbij voordat er interactie kan optreden. De remedie is de neutronen te vertragen, ook wel modereren genoemd. Dat kan door de neutronen af te remmen door botsingen met atoomkernen, alleen mogen die atoomkernen de neutronen natuurlijk niet absorberen. Koolstof in de vorm van grafiet is heel geschikt en ook water, en met name zwaar water. Bij zwaar water zijn bij de twee waterstofatomen de kern vervangen door een deuteriumkern (dus een proton plus neutron). Gemodereerde neutronen zijn afgeremd tot een snelheid in evenwicht met de omringende temperatuur (2,2 km/s). Daarom worden deze neutronen thermische neutronen genoemd in tegenstelling tot snelle neutronen. De energie van een thermisch neutron is maar 0,025 eV, honderd keer minder dan de energie van een foton in het zichtbare licht. De Duitsers hadden rond 1938 ook ontdekt dat de neutronen geremd moeten worden tot deze thermische snelheid om kernsplijting mogelijk te maken. Hun pogingen om een werkende kernreactor te bouwen mislukten echter keer op keer. Einstein heeft op aandringen van Szilard en Wigner op 2 augustus 1939 een brief aan president Roosevelt geschreven om hem ervoor te waarschuwen dat

de Duitsers bezig waren een kernbom te ontwikkelen en pleitte ervoor om in de VS zelf zo'n programma op te zetten. Roosevelt heeft dit advies ter harte genomen. In het grootste geheim is in Chicago een proefopstelling gemaakt.

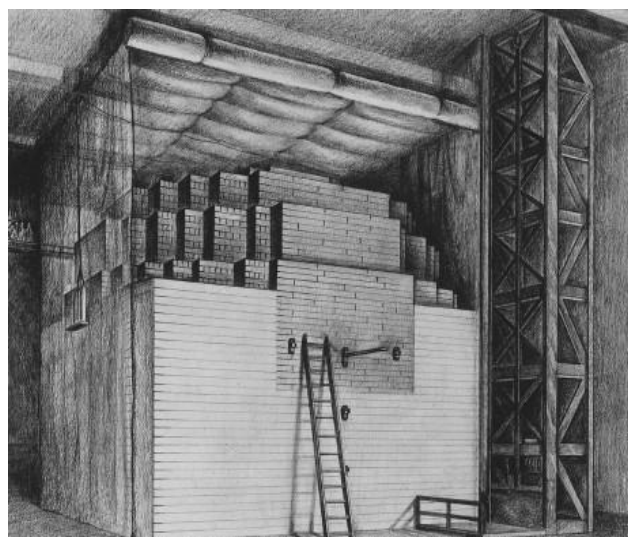


Dit is een goed moment om de complementaire functie van modereren en uraniumverrijking te illustreren in één grafiek. Met natuurlijk uranium met maar 0,7% U-235 kun je bijna geen kettingreactie in stand houden. Je hebt er heel veel grafiet of zwaar water voor nodig. De Duitsers hadden geen zwaar water. De zwaar water fabriek in Vemork in Noorwegen was in 1943 door Britse en Noorse commando's vernietigd. Met 4% verrijkt uranium zoals in West-Europa gebruikelijk is, kun je volstaan met gewoon water als moderator. Als je 20% verrijkt uranium gebruikt kan dat ook en heb je veel minder uranium nodig. Bij 100% verrijking is er helemaal geen grafiet of water nodig en is 15 kg uranium al voldoende om een ontploffing te veroorzaken. Deze hoeveelheid is de zogenaamde kritische massa.

Hoe kun je nu het vermogen van een kernreactor veilig op een hoger of lager niveau brengen? Heb je daar tijd genoeg voor? Als je bedenkt dat de tijd tussen twee opeenvolgende splitsingen in de kettingreactie in de orde ligt van nanoseconden, is het niet voorstelbaar dat je nog kan ingrijpen zodra de

vermenigvuldigingsfactor groter is dan 1. De ontploffing zal vrijwel direct volgen.

De natuur heeft ons een uitweg geboden in de vorm van de zogenoemde vertraagde neutronen. De term “vertraagd” betekent in dit geval niet “gemodereerd”, maar iets later na de splijting vrijkomend. Een fractie van 0,7% van de neutronen komt vertraagd vrij, met gemiddelde vertraging van 10 seconden. Zolang je nu zorgt dat de fractie direct verschijnende neutronen, de zogenoemde prompte neutronen, beneden de 99,3% blijft, kun je de reactor prima regelen, zo blijkt uit de praktijk. Overigens, die fractie vertraagde neutronen is een eigenschap van de splijtstof, niet van het reactorontwerp. Voor uranium is het 0,7% maar voor plutonium is het 0,3% waardoor de regeling voor plutonium wat “zenuwachtiger” is.

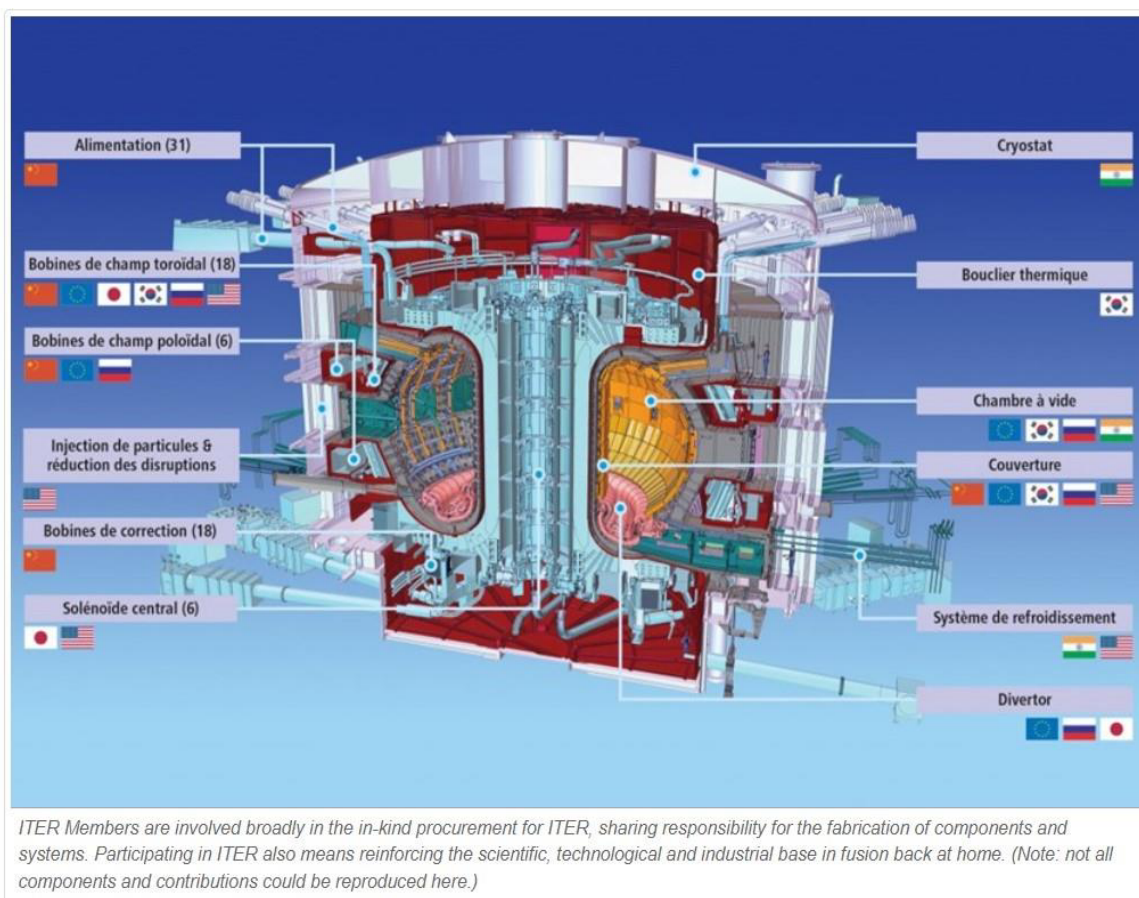


Pile 1, de eerste kernreactor, 1942, Chicago. 330 ton grafiet en 50 ton natuurlijk uranium.

De Amerikaanse proefopstelling in Chicago, de Pile 1 reactor, was een simpele stapeling van blokken grafiet (440 ton) en 5 ton uranium en 45 ton uraniumoxide. De stapeling had geen koeling. Men kan zich nu de roekeloosheid van een dergelijk experiment midden in een stad niet meer voorstellen. Fermi en Compton hadden berekend dat criticaliteit net bereikt zou kunnen worden en dat er dank zij de vertraagde neutronen genoeg tijd zou

zijn om te reactie te stoppen zonder explosie. Voor de veiligheid was een staaf met neutronenabsorberend cadmium als een soort zwaard van Damocles boven de stapel gehangen aan een touw dat met een bijl doorgehakt zou kunnen worden. Zodra de neutronenfluxmeter aan zou geven dat de reactor kritisch was geworden zou het commando “SCRAM” worden gegeven. Gelukkig begon ruim van te voren de neutronenmeter al uit te slaan, waarmee was aangetoond dat een kernreactor mogelijk was. Onder leiding van Oppenheimer werd het Los Alamos programma gestart waarin de eerste atoombommen zijn ontwikkeld. Intussen was het de Duitsers steeds maar niet gelukt om hun proefopstelling tot criticaliteit te brengen. Zij wisten niet dat hun grafiet niet zuiver genoeg was en dat het spoortjes borium waren die hen de das omdeden. Er zijn allerlei stoffen die in meer of mindere mate neutronen absorberen maar cadmium en borium zijn buitengewoon effectieve neutronenvangers. Deze stoffen worden nu standaard gebruikt voor de regeling van het vermogen van een kernreactor, cadmium in regelstaven en borium in boorzuur dat aan het koelwater is toegevoegd.

Zoals je kan zien was de Chicago PILE 1 een wonder van eenvoud. Vergelijk dit eens met de kernfusiereactor ITER in Cadarache in Frankrijk.



Deze installatie is nodig om het hete plasma van miljoenen graden Celsius in bedwang te houden met magneten die supergeleidend zijn door ze te koelen met vloeibaar helium vlakbij het absolute nulpunt. Kernfusie heeft de belofte de zon te imiteren en schone kernenergie te gaan leveren zonder dat daar radioactief afval bij vrijkomt. Op grond van die belofte zijn er tientallen miljarden geïnvesteerd in ITER. Wat is de realiteit? De volumetrische vermogensdichtheid in het centrum van de zon is maar 275 W/m³, vijf keer minder dan die van het menselijk lichaam! En dat terwijl de temperatuur daar 15 miljoen Kelvin is bij een druk van 200 miljard atmosfeer en een dichtheid van 150 kg/liter! Die omstandigheden zijn natuurlijk onmogelijk te realiseren op aarde en dan nog zou de energieopbrengst veel te weinig zijn om enig nut te hebben. Men gaat het dan ook anders doen. In ITER is gekozen voor fusie van deuterium met tritium. Er wordt een temperatuur van 100 miljoen K beoogd, dus hoger dan in het centrum van de zon, maar een druk van slechts 3 atmosfeer. De dichtheid is hierbij slechts ca 1 mg/m³, met een plasma van deuterium en tritium. Bij fusie van deuterium en tritium ontstaat één heliumkern en een neutron plus een heleboel energie (17,6 MeV), waarvan 80% naar het neutron en 17% naar het alfadeeltje (heliumkern). 3% ontsnapt als straling van gamma's en neutrino's. De energiedichtheid wordt 1,2 MW/m³, 5000 keer hoger dan die in de zon. Toch nog steeds 160 keer minder dan de vermogensdichtheid in een klassieke splijtingsreactor.

De verklaring van deze schijnbare tegenstrijdigheid is dat de limiterende factor voor de kernfusie in de zon gelegen is in de primaire proton-proton fusie, waarbij twee waterstofkernen fuseren tot één deuteriumkern

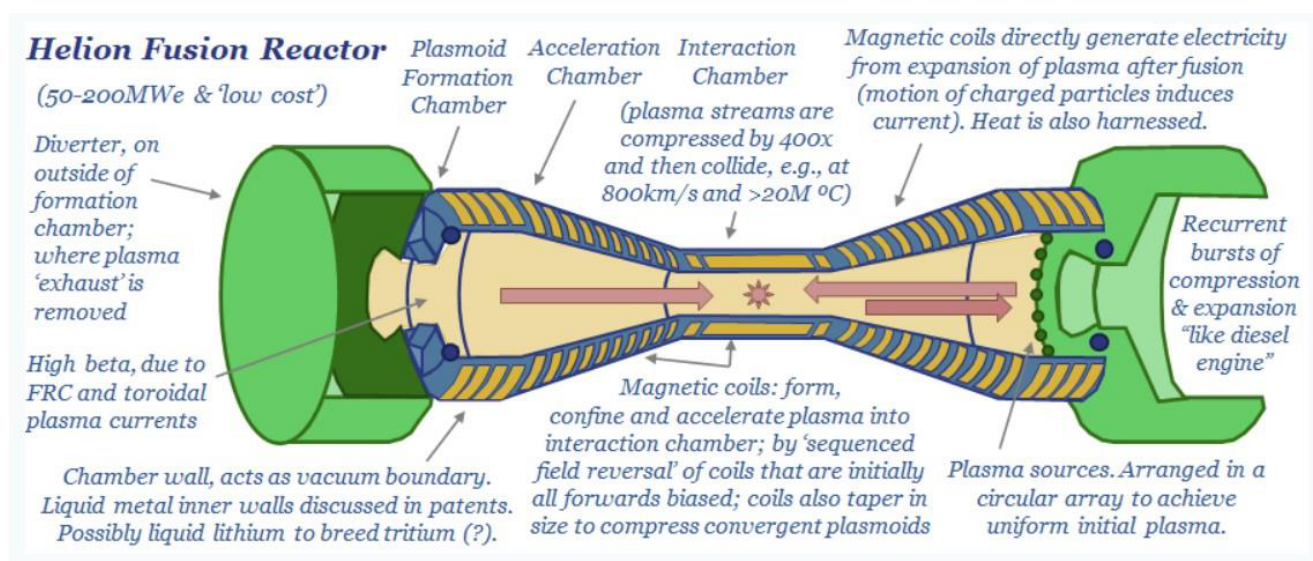
Proton (H) + proton(H) → 2H (deuterium) + positron

Deze reactie staat aan de basis van de verdere fusiereacties. Als je éénmaal deuterium hebt gaan de daaropvolgende fusies heel snel. Uit deuterium plus een proton ontstaat via tritium ³He en uit twee ³He kernen ontstaat ⁴He plus twee protonen. Dit Helium-4 is het dominante eindproduct van de fusiereacties, maar daarnaast ontstaan tijdelijk ook kernen van lithium en beryllium.

Het volumetrisch vermogen in een normale splijtingsreactor zoals de EPR is 100 MW_{thermisch}/m³, (ofwel 35 MW_{elektrisch}/m³). ITER heeft een beoogd thermisch vermogen van 500 MW_{thermisch} bij een plasmavolume van 830 m³, dus een vermogensdichtheid van ruim 0,6 MW/m³, 160 keer minder dan een splijtingsreactor.

Het is tot nu toe gelukt om gedurende 10 seconden meer vermogen aan kernfusie in stand te houden dan er aan energie wordt ingestopt. Ik zie niet in hoe het moet gaan als er binnenin werkelijk 1000 MW aan vermogen wordt geproduceerd. Hoe haal je dat er uit zonder de koeling met helium te verstoren? Het idee is dat de geproduceerde snelle neutronen door een gat, de zogenaamde divertor, aan de onderkant van de toroïde er uit vliegen en daar

hun energie kunnen overdragen aan een nog onbekend warmtetransportmiddel. Bij kernsplijting zit maar 5% van de energie in de neutronen, bij kernfusie is het 80%! De energie dragende neutronenflux zal heel veel radioactiviteit gaan induceren, veel meer dan in een splijtingsreactor. Van schone energie zal geen sprake zijn. Daarom wordt er ook gewerkt aan een methode waarbij geen neutronen vrijkomen. Een op het eerste gezicht elegant ontwerp voor neutronenvrije fusie is de “Helion fusion reactor”.

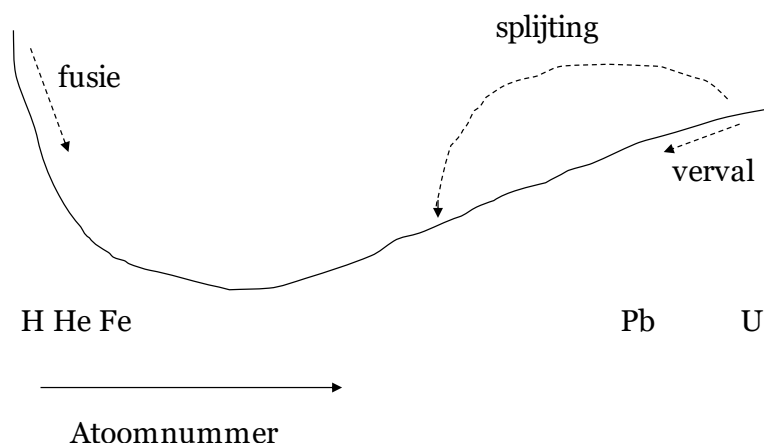


Werkt niet volgens <https://youtu.be/3vUPhsFoniw?si=CPErLCpgKq0PUplD>

Maar helaas, uit het kritische commentaar in de getoonde link (<https://youtu.be/3vUPhsFoniw?si=CPErLCpgKq0PUplD>) blijkt dat het niet zal kunnen werken en zelfs nog veel meer radioactiviteit zal produceren dan de ITER-achtige methode. Jammer, kernfusie gaat het niet worden.

Misschien vraagt u zich af hoe het kan dat zowel kernfusie als kernsplijting energie kan opleveren.

Energie-inhoud van de atoomkern



De verklaring hiervan is dat deze twee aan de uiteinden van het periodiek systeem zitten. In de atoomkernen bestaat een subtiel evenwicht tussen de sterke aantrekkende kernkracht en de eveneens sterke afstotende elektrische kracht. Bij de lichtere elementen aan de linkerkant overheerst de aantrekkende kracht door de sterke kernkracht en levert kernfusie energie op. Dit is de energiebron van de zon waar de protonen (de kern van waterstof) fuseren tot een heliumkern die bestaat uit twee protonen en twee neutronen. Bij de zware elementen aan de rechterkant overheerst de afstoting tussen de positief geladen protonen. Dan levert splijting juist energie op. De sterke kernkracht werkt alleen op heel korte afstand. Een atoomkern met alleen protonen bestaat niet, er zijn neutronen nodig voor de binding. Simpel gezegd kun je de sterke kernkracht vergelijken met een klittenband die de protonen en neutronen bij elkaar houdt. Naarmate het atoomgewicht groter is, zijn er meer protonen aanwezig en wordt de afstotende kracht steeds groter. Zware elementen kunnen alleen stabiel blijven doordat ze relatief meer neutronen bevatten dan lichte elementen. Lood en bismuth zijn de zwaarste elementen die nog stabiel zijn. Bij nog zwaardere elementen zoals radium lukt het de neutronen niet meer om de zaak bij elkaar te houden en wordt af en toe een alfadeeltje (in feite een heliumkern) of een betadeeltje (een electron)

uitgestoten. Dit noemen we radio-actief verval. Vaak komt hierbij ook nog extra energie vrij in de vorm van gammastraling. Uiteindelijk zal alle radio-activiteit verdwijnen maar uranium en thorium vervallen zo traag dat er na de vorming van ons zonnestelsel 4,5 miljard jaar geleden, nog genoeg van over is om als energiebron te gebruiken. Overigens, als je terugrekent naar de verhouding uranium 235 en 238 ten tijde van de vorming van ons zonnestelsel vind je dat het aandeel uranium 235 wel 20% moet zijn geweest. Dat wordt nu als hoogverrijkt uranium beschouwd! In die begintijd moet de aarde voortdurend geteisterd zijn geweest door spontane nucleaire explosies! Het geologisch bewijs van het bestaan hiervan is aangetoond in de uraniummijn van Oklo in Gabon, zoals blijkt uit de aanwezigheid van vervallen splijtproducten en sterk verarmd uranium.

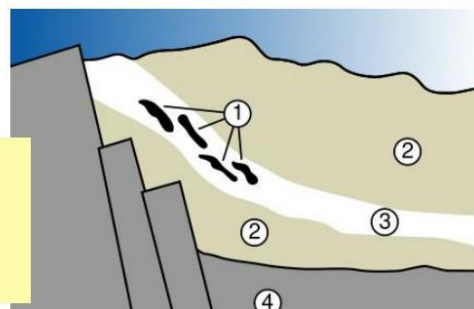
Gabon natural fission reactors

- Predicted by Paul Kuroda (Univ. of Arkansas) (1956).
- Fifteen natural reactors found (in 1972) at the Oklo mine in Gabon.
- Nuclear fission reactions took place 1.5 billion years ago, and ran for a few hundred thousand years (100 kW).
- Uranium-rich mineral deposit became inundated with groundwater that acted as a neutron moderator.
- Extensively studied by scientists interested in geologic radioactive waste disposal.



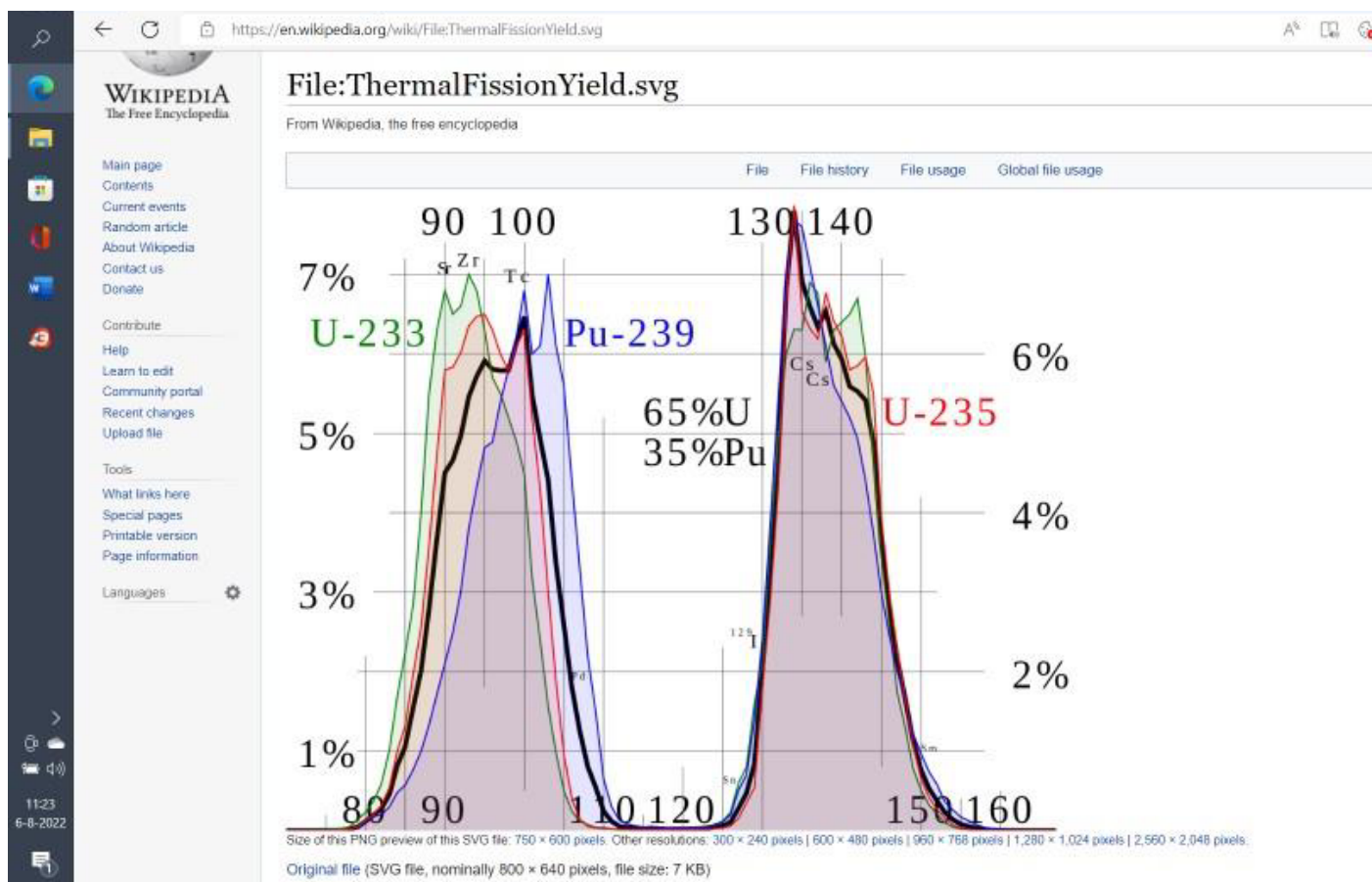
Geological situation in Gabon leading to natural nuclear fission reactors

1. Nuclear reactor zones
2. Sandstone
3. Uranium ore layer
4. Granite



25

Het interessante is dat zelfs na een miljard jaar de restanten nog op hun plaats zijn gebleven, dankzij de adsorptie-eigenschappen van de bodem. Van deze eigenschap van de diepe ondergrond wordt ook gebruikt gemaakt bij de restberging van langlevend radioactief afval. Daarover later. Nu eerst terug naar de splijting van de atoomkern.

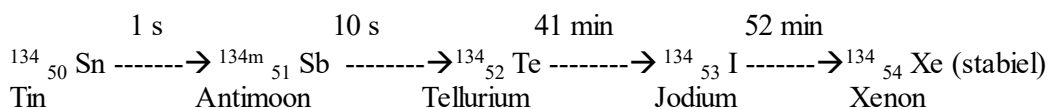


Het minder zware deel links heeft een atoomgewicht tussen de 85 en 110, het zwaardere deel rechts tussen de 125 en 150. Bij de zwaardere delen zijn cesium en jodium prominent aanwezig en bij de lichtere delen vooral strontium, zirconium en technetium. In de soep van splijtingsproducten zijn de meeste erg onstabiel en vervallen binnen enkele seconden tot uren. Het gevolg hiervan is dat de energieproductie in een kerncentrale na een noodstop niet instantaan nul is. In de eerste seconden is het nog 6 procent van het net voorafgaande vermogen. Na een dag is dit gezakt tot 1 procent en na een jaar tot 0,1 procent. Daarom is na een splijtstofwissel nog een jaar lang koeling in een waterbassin nodig. Daarna worden de splijtstofbuizen verstuurd naar La Hague in Normandië voor opwerking en recycling.

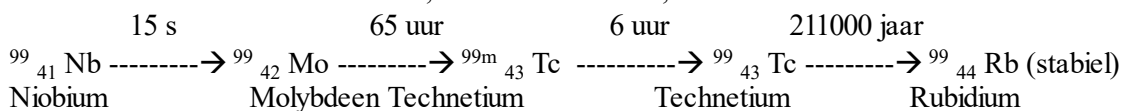
Deze dia toont een klein verschil tussen de kamelenruggen voor uranium 235 (in rood), plutonium 239 (in blauw) en uranium 233 (in groen). De zwarte lijn is voor MOX, een mengsel van uranium en plutonium dat ontstaat na opwerking en recycling. Uranium 233 is de isotoop die in feite verspleten wordt wanneer we thorium gebruiken. Daarom zal een thorium reactor vrijwel dezelfde splijtproducten opleveren als een uranium reactor. Het voordeel van thorium zit er in dat er veel minder elementen actiniden (atoomkernen zwaarder dan

uranium) gevormd worden (zie verderop in deze lezing). Nu nog een ander voorbeeld: de splijtproducten tin en niobium

De vervalketen van de ene helft, het tin atoom is :



De vervalketen van de andere helft, het Niobium atoom, is:



Je kunt hierbij zien dat de radio-activiteit snel afneemt omdat de opeenvolging in de vervalketen steeds trager gaat. Uiteindelijk ontstaat een stabiel isotoop. Meestal gaat dat snel, soms duurt het lang, zoals bij de onderste reeks waar Technetium-99 ontstaat. Door het trage verval is Technetium maar heel zwak radioactief.

Hier zien we een indeling van de splijtproducten naar percentage van voorkomen en naar halfwaardetijd:

Half-life range (a)	Fission products of ^{235}U by yield ^[2]		
	4.5–7%	0.04–1.25%	<0.001%
4–6 a	†	$^{155}\text{Eu}^b$	
10–29 a	^{90}Sr	^{85}Kr	$^{113m}\text{Cd}^b$
29–97 a	^{137}Cs	$^{151}\text{Sm}^b$	^{121m}Sn
141–351 a	No fission products have a half-life in the range of 100 a–210 ka ...		
430–900 a			
1.3–1.6 ka			
4.7–7.4 ka			
8.3–8.5 ka			
24.1 ka			
32–76 ka			
150–250 ka	$^{99}\text{Tc}^c$	^{126}Sn	
327–375 ka	†	$^{79}\text{Se}^c$	
1.53 Ma	^{93}Zr		
2.1–6.5 Ma	$^{135}\text{Cs}^c$	^{107}Pd	
15–24 Ma		$^{129}\text{I}^c$	
80 Ma	... not beyond 15.7 Ma ^[5]		

In de linker tabel zijn de snel vervallende splijtproducten weggelaten. Deze vormen geen probleem bij het radio-actieve afval.

Eigenlijk zijn alleen de splijtproducten met een halfwaardetijd tussen de 4 en de 100 jaar gevaarlijk. Deze staan bovenin. Je kunt zien dat strontium en cesium daarbij dominant zijn. Krypton-85 is een edelgas en wordt bij de verwerking van radio-actief afval in de atmosfeer geloosd.

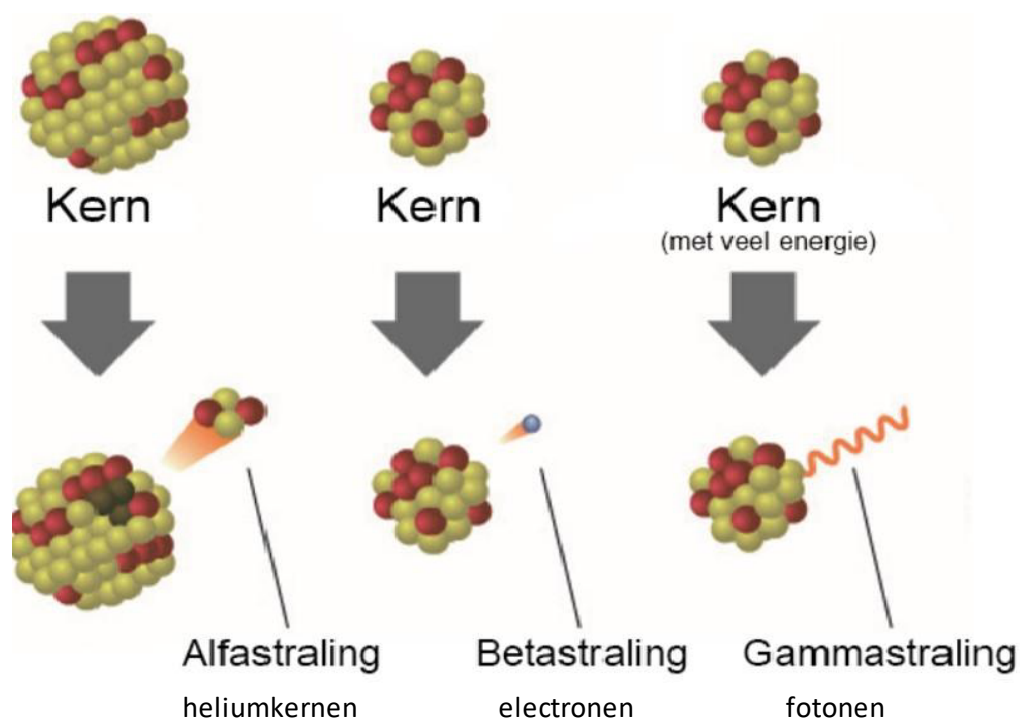
Bij de langlevende splijtproducten (in blauw onderaan) is Technetium dominant.

In de praktijk zijn deze langlevende, dus traag vervallende, splijtproducten ongevaarlijk.

Linksboven strontium en cesium die relatief het meest voorkomen en die allebei een halfwaardetijd van circa 30 jaar hebben. In de linker tabel zijn de snel vervallende splijtproducten weggelaten. Deze vormen geen probleem bij het radioactieve afval.

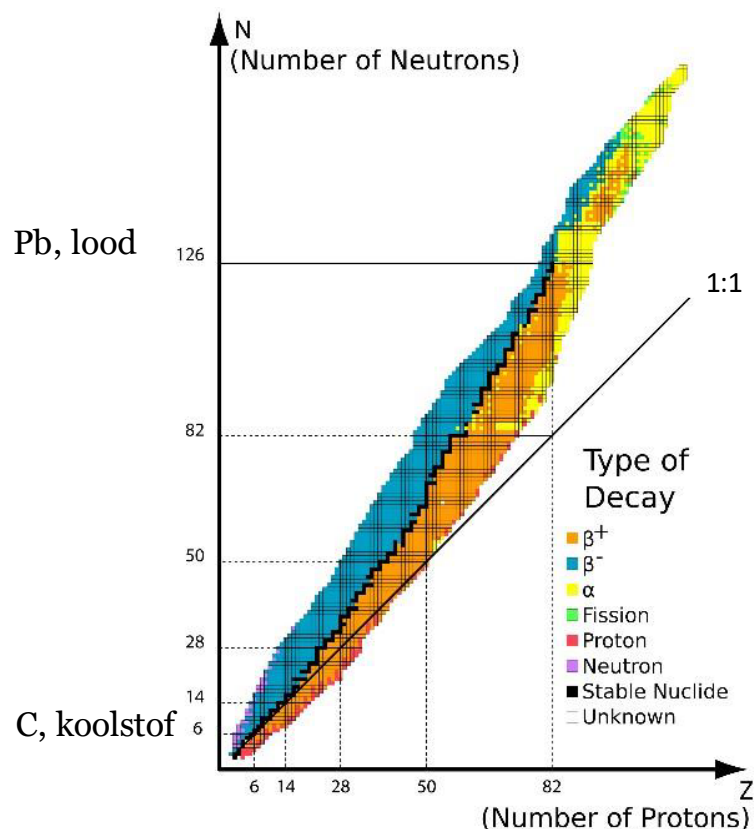
Eigenlijk zijn alleen de splijtproducten met een halfwaardetijd tussen de 4 en de 100 jaar gevaarlijk. Deze staan bovenin. Je kunt zien dat strontium en cesium daarbij dominant zijn. Krypton-85 is een edelgas en wordt bij de verwerking van radioactief afval in de atmosfeer geloosd waar het verder ongevaarlijk is. Bij de langlevende splijtproducten (in blauw onderaan) is Technetium dominant. In de praktijk zijn deze langlevende, dus traag vervallende, splijtproducten ongevaarlijk.

De drie belangrijkste typen radioactieve straling die uit een atoomkern kunnen komen zijn alfa- beta- en gammastraling.



Zij hebben hun benaming in deze volgorde te danken aan de chronologie van hun ontdekking maar hun penetratiediepte verloopt ook in deze volgorde. Alfastraling wordt al tegengehouden door de opperhuid of door een papiertje, maar eenmaal binnen het lichaam kan het vanuit darmen, longen of aderen wel veel schade aanrichten in levend weefsel. Litvinenko is vergiftigd met de alfastraler polonium in zijn thee. Alfastraling bestaat uit klontjes van twee protonen en twee neutronen, identiek aan heliumkernen zoals is aangetoond door Rutherford in 1909. Betastraling dringt dieper door, enkele tientallen centimeters. In 1900 had Becquerel al bewezen dat de zogenoemde betastraling in feite bestaat uit elektronen. Gammastraling is elektromagnetische straling, net als radio, licht en röntgen straling, maar het heeft een veel kortere golflengte en het is veel energierijker. Het dringt nog dieper door dan betastraling, maar toch is 4 m beton of 10 m water voldoende om het tegen te houden, denk aan de foto van de reactorkern in Petten.

Waarom zijn radioactieve stoffen nu eigenlijk radioactief?

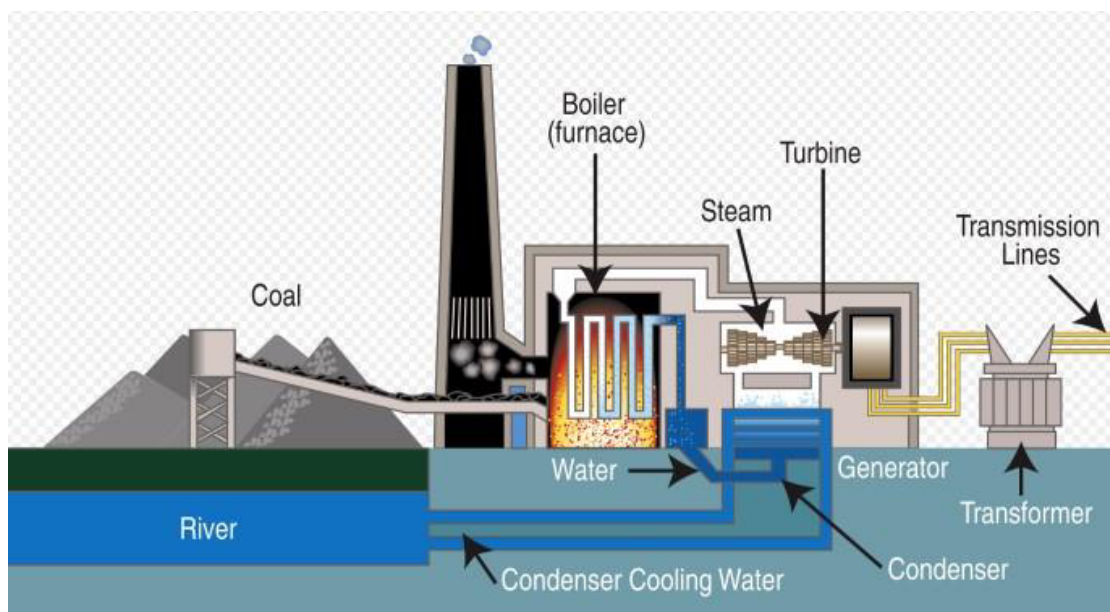


Kortgezegd: er is geen evenwicht tussen de elkaar afstotende protonen en de elkaar aantrekkende sterke kernkrachten, doordat er in de atoomkern ofwel teveel neutronen zijn (in het blauwe gebied) ofwel te weinig neutronen zijn (in het oranje gebied). Bij radioactief verval schuift de atoomkern een eindje op naar de zwarte stabiele band. Die band van stabiliteit is niet breed. Helemaal linksonder zien we bijvoorbeeld het koolstofatoom waarin 6 protonen en ook 6 neutronen zitten. Dat is koolstof met een atoomgewicht van 12. Dat is stabiel maar het radioactieve C-14 bevat 8 neutronen. Rechts bovenin zit lood. Lood bevat relatief veel meer neutronen dan de lichte elementen links onder. Bij radioactief verval komt meestal betastraling vrij en ook nog gammastraling. Tabel 25 van BINAS geeft een keurig overzicht. Nu is opvallend dat de zwarte lijn van stabiliteit ophoudt bij lood en daar overgaat in een lichtgroen gebied. Daar beginnen de zwaarste elementen die geen enkel stabiel isotoop hebben. De bekendste hiervan is uranium. Bij splijting hiervan komen de twee brokstukken in het blauwe gebied want de band van stabiliteit heeft een opwaartse kromming. We hebben al wat splijtproducten in een paar dia's langs zien komen, bijvoorbeeld cesium en strontium die elk een halfwaardetijd van 30 jaar hebben. Niet de miljoenen jaren die vaak worden genoemd voor het

hoogradioactieve afval. Daarvoor moeten we naar de actiniden. Dat zijn geen splijtproducten maar elementen die door invang van een neutron nog zwaarder zijn geworden dan uranium. Bijvoorbeeld bij invang in het niet-splijtbare uranium 238 ontstaat uranium -239. Dit vervalt al snel, - na enkele dagen -, tot plutonium-239. Plutonium-239 is heel goed splijtbaar en daardoor prima geschikt voor kernwapens en ook voor gebruik in een kernreactor. Maar, ook plutonium-239 kan een neutron invangen zonder tot splijting te komen. Dan ontstaat plutonium 240. En dit kan nog een keer gebeuren zodat Americium-241 ontstaat. Ik heb nog een rookmelder gehad waar Americium in zat.

Overigens, Plutonium 239 is alleen gevaarlijk als je het in gedispergeerde vorm binnenkrijgt. Je kunt het rustig aanraken. Het zendt alleen alfastraling uit. En omdat alfastraling door een heel dun laagje materie wordt tegengehouden is het bijna niet te detecteren als het ergens in zit. In 1975 heeft de consumentenactivist Ralph Nader plutonium de giftigste stof op aarde genoemd die de mensheid kent. Deze kwalijke leugen heeft de mensen onterecht de stuipen op het lijf heeft gejaagd. Bernard Cohen heeft de leugen in 1977 ontkracht (*Health Physics*, Vol. 32, pp. 359–379, 1977).

Dan kom ik nu op de werking van verschillende typen kerncentrales, maar ik begin met een klassieke kolencentrale.

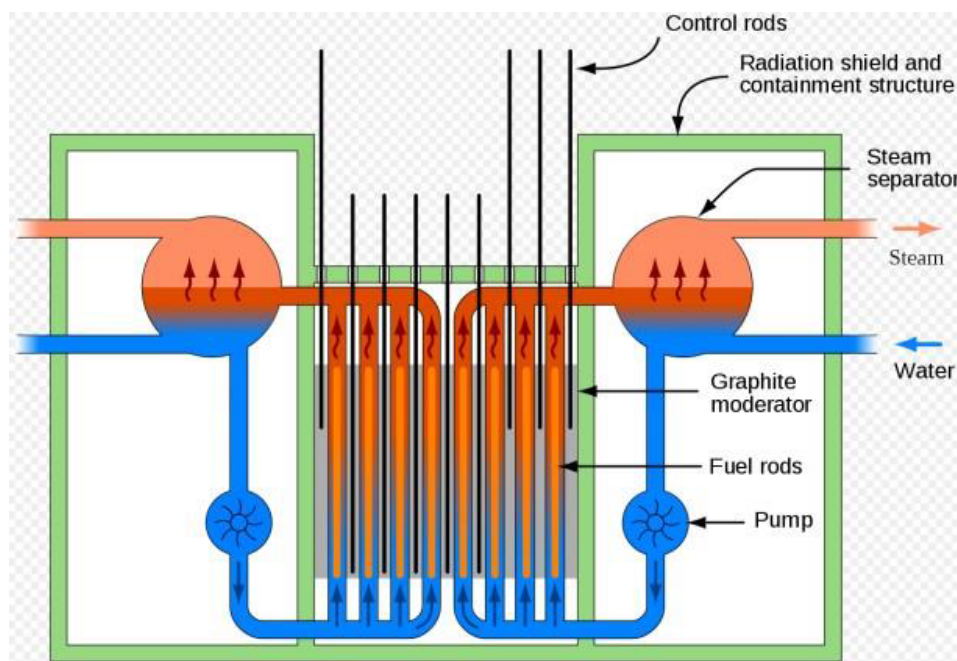


Typical coal-based power plants operating at steam pressures of 170 bar and 570 °C run at efficiency of 35 to 38%, with state-of-the-art fossil fuel plants at 46% efficiency.

In een kolencentrale omgeeft het brandende vuur de waterbuizen. De stoomdruk loopt op tot 170 bar bij een temperatuur van meer dan 500 C. De verhitte stoom gaat direct naar de turbines. De buizen kunnen de enorme druk goed weerstaan. Nu kun je de ruimtelijke combinatie van warmtebron en water ook andersom uitvoeren. Je hangt niet de waterbuizen in het vuur zoals bij deze kolencentrale, maar je laat het water juist de warmte genererende splijtstofstaven omspoelen, net als in een waterkoker. Dit gebeurt in de meeste gangbare centrales in Europa. Het reactorvat is één groot vat met een veel grotere diameter dan een buis. De wand moet enorm sterk zijn om de grote druk te kunnen weerstaan.

De fabricage van zo'n sterk groot vat van speciaal staal is een technologisch hoogstandje. De Sovjetunie en ook Canada beschikten niet over deze technologie. De fabricage van buizen die bestand zijn tegen de zeer hoge druk, zoals in ouderwetse kolencentrales, is veel eenvoudiger. Dat is de reden dat Canada de Candu reactor heeft ontwikkeld en de Sovjetunie de RBMK reactor. De Candu zal ik niet bespreken maar de RBMK wel om het verschil met de West-Europese reactoren te laten zien.

RBMK reactor



De opbouw van de RBMK reactor doet sterk denken aan de Amerikaanse proefreactor Pile-1. Er zit enorm veel grafiet in voor het modereren, vijfmaal zoveel als in de Pile 1, namelijk 1700 ton grafiet en viermaal zoveel uranium, 190 ton. Dat is nodig omdat de verrijkingsgraad in de RBMK reactor (de Tsjernobyl reactor) maar 2% was, vandaar dat er zoveel grafiet en uranium nodig was. In de volgende dia zie je een woud van waterbuizen met onder en boven de aan- en afvoerbuizen.

Elke verticale buis bevat een warmte genererende splijtstofstaaf. Het water in de buizen dient voor koeling en het warmtetransport naar de turbines voor de elektriciteitsopwekking. Er is zoveel grafiet aanwezig dat het water weinig bijdraagt tot modereren. Wel absorbeert het water veel meer neutronen dan het grafiet en dat betekent dat minder neutronen worden geabsorbeerd als het water uitzet of als er belvorming optreedt. Dat gebeurt bij stijgende temperatuur, zodat het vermogen van de reactor nog verder stijgt. Een positieve terugkoppeling dus, juist iets wat je niet wil! Dit is één van de oorzaken waardoor de Tsjernobyl reactor op 26 april 1986 is ontploft. Andere factoren waren de haast om het riskante experiment nog vóór 1 mei klaar te

krijgen en de onbekendheid met het verschijnsel “xenon poisoning”. Zie ook het boek “Nacht in Tsjernobyl”.

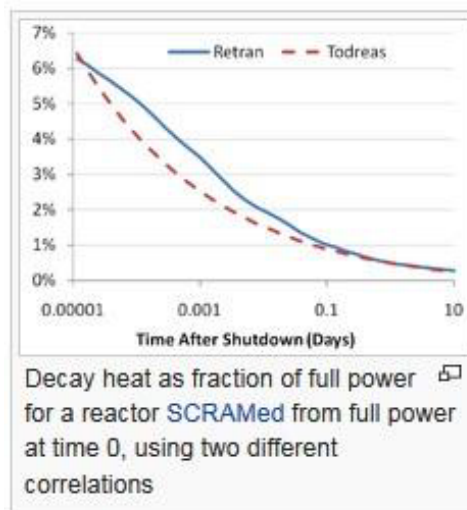
Deze RBMK reactoren hadden een tweeledig doel: civiel en ook militair, dat wil zeggen aanmaak van plutonium 239 uit uranium 238. Nu is het probleem voor militaire toepassing dat plutonium 239 vervolgens nog een neutron kan invangen waardoor plutonium 240 ontstaat. In het Manhattan project was al gebleken dat dit vervelend is want het maakt de bom onbetrouwbaar. Plutonium 240 kan spontaan splijten. Dat is in een continu werkende reactor geen probleem maar bij een kernbom kan het tot een premature en onvolledige ontploffing leiden. Daarom moet voor militaire toepassing de splijtstof regelmatig vervangen worden zodat het gevormd plutonium nog bruikbaar is. Daarom was de RBMK reactor zo geconstrueerd dat elke splijtstofstaaf afzonderlijk verwisseld kon worden zonder de reactor stil te leggen. Dat is met de Europese reactoren absoluut niet mogelijk omdat alle splijtstofstaven in één groot hermetisch afgesloten reactorvat zitten. Dankzij de verrijkingsgraad van 4% is geen grafiet nodig en volstaat het primaire koelwater als moderator. Er is ook veel minder uranium nodig per reactor dan in de RBMK reactor, nl 24 ton en niet 190.

De ontploffing in Tsjernobyl was een kritikaliteitsexplosie, dus echt door het uit de hand lopen van de kettingreactie van de uraniumsplijting. Alle moderne kerncentrales hebben voldoende negatieve terugkoppeling om zo’n soort explosie te voorkomen.

Waaruit bestaat die negatieve terugkoppeling? Als er minder elektriciteit nodig is wordt de stoomtoevoer eenvoudigweg verminderd. De reactor kan dan zijn warmte minder kwijt en wordt dus heter. Dan gebeuren er twee dingen waardoor de reactor minder hard gaat werken. Ten eerste zet het water in het reactorvat uit waardoor de modererende werking van het koelwater afneemt. Ten tweede neemt het verlies aan neutronen toe door invang in het niet-splijtbare U-238, zodat de totale neutronenflux afneemt. Dit effect wordt het nucleair Doppler effect genoemd. Een kerncentrale is dus prima regelbaar.

Hierdoor wordt een explosie zoals in Tsjernobyl voorkomen maar hoe zat het dan in Fukushima? Daar had de centrale de extreem zware aardbeving goed doorstaan en was zonder problemen afgeschakeld. Alles leek goed te gaan, tot na een half uur de tsunami kwam. De beschermende dijk werd overspoeld en de aggregaten voor de koelwaterpompen vielen uit. De centrale was al een half uur uitgeschakeld maar het probleem was de restwarmte die niet goed werd afgevoerd.

Restwarmte na noodstop kan 300 m³ water verdampen



De restwarmte die afkomstig is van het verval van splijtproducten, gaat nog een poosje door. Het verschijnsel restwarmte zelf kan met een ander reactorontwerp niet worden voorkomen, maar wat wel kan is zorgen voor voldoende natuurlijke ventilatie die ook zonder pompen door blijft gaan. Op het moment van afschakeling bedraagt de restwarmte 6% van het vermogen bij afschakeling en is na één dag gedaald tot 1%.

De nieuwere reactorontwerpen garanderen passieve veiligheid. Ze zijn in het jargon “walk-away safe”. Daarmee wordt bedoeld dat natuurlijke koelingsprocessen voldoende zijn om de restwarmte af te voeren, ook bij uitval van koelpompen. Oververhitting en kernsmelt wordt hiermee voorkomen. Ook de ontwerpen die Nederland nu op het oog heeft en die ik later zal noemen, voldoen aan deze eis.

De reactor in Fukushima was niet zo ontworpen. Na uitval van de koelwaterpompen liep de temperatuur in de reactorkern steeds hoger op. Boven 1700 C begon het zirconium in de buizen met splijtstof water te reduceren zodat er waterstofgas ontstond. Er was onvoldoende ventilatie en vervolgens heeft een explosie van knalgas het reactordak er afgeblazen. Ook uit dit ongeluk is lering getrokken.



De kerncentrale bij Borssele

Zo zijn hydrogen combinators tegenwoordig standaard, ook in Borssele. Mocht er waterstof vrijkomen in de reactorruimte, dan verwijderen de combinators dit door catalytische oxydatie. Andere voorbeelden: In Tihange is de overstromingsmuur verhoogd om mogelijk uitzonderlijk hoogwater in de Maas tegen te houden. In Borssele is de reactor geheel omgeven door een bol die zo sterk is dat hij de inslag van een Boeing 737 kan weerstaan. Binnenin het containment wordt de lucht continu onder onderdruk gehouden om lek van binnenlucht naar buiten te voorkomen. Bij de tegenwoordige centrales is onder het reactorvat een “core catcher” aangebracht die bij eventuele smelt van het reactorvat de vloeibare massa opvangt en van de ondergrond isoleert.

Waar is de angst voor kernenergie begonnen? Marco Visscher gaat in zijn boek “Waarom we niet bang hoeven te zijn voor kernenergie” uitgebreid op deze vraag in.

Marco Visscher, “Waarom we niet bang hoeven te zijn voor kernenergie”

De demonisering van kernenergie is begonnen bij Günther Schwab
 “Bij de duivel te gast”, 1968
 Stichting “*World Union for the Protection of Life*”



Günther Schwab staat aan de basis van de demonisering (letterlijk!) van kernenergie. Hij was een Oostenrijks bosbouwer en aanhanger van de nazi-ideologie. Hij was een natuurbeschermer en verfoeide de moderne samenleving en daarmee ook kernenergie, de ultieme oplossing van het energieprobleem. In 1968, toen zijn boek *Morgen holt dich der Teufel* (vertaling: *Bij de duivel te gast*) voor het eerst werd gepubliceerd, behoorden Günther Schwab en zijn stichting *World Union for the Protection of Life* tot de voorlopers van campagnes tegen kerncentrales.

Deze beweringen vielen in de jaren 60 en 70 in vruchtbare bodem. Greenpeace werd opgericht, gestart als actiegroep tegen olieboringen in een natuurgebied in Alaska, maar kreeg pas vleugels toen het zich ging richten tegen kernbomproeven en later tegen kernenergie in het algemeen. De bestrijding van kernenergie is al decennia hoofddoel van Greenpeace, zie bijvoorbeeld <https://www.greenpeace.org/nl/klimaatverandering/45781/kernenergie-is-niet-de-oplossing/>

De beweringen van Greenpeace over kernenergie zijn gemeengoed geworden bij natuurminnend Nederland. De Postcode Loterij steunt Greenpeace al sinds 1996. Sinds de start van de samenwerking heeft Greenpeace van de loterij 72,9 miljoen euro ontvangen om haar activiteiten te versterken en Milieudefensie 37,2 miljoen.

Greenpeace schroomt niet om leugens en misleiding op de site te zetten. Ook het WWF verdraait de waarheid. Terwijl 75% van de elektriciteit in Frankrijk met CO₂-vrije kernenergie wordt opgewekt heet het WWF in hun "score cards" rapport uit 2009 de CO₂ emissie per kWh in Frankrijk ten onrechte gelijkgesteld aan die van aardgas want *"WWF does not consider nuclear power to be a viable policy option."*

Bijna alle linkse partijen hebben de afwijzing van kernenergie overgenomen. In een Kamercommissie debat over kernenergie in oktober verleden jaar moest PvdA kamerlid Joris Thijssen terugvallen op "De PvdA is nu eenmaal tegen kernenergie."

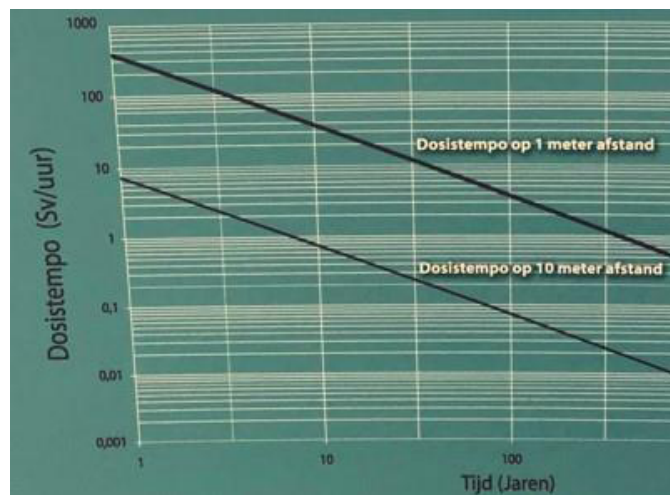
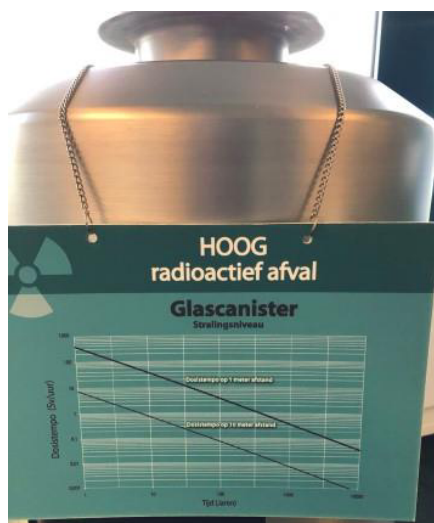
Maar het afval dan dat hier zo angstwekkend is afgebeeld?



Is het wel zo gevaarlijk als men denkt? Natuurlijk, je moet er zorgvuldig mee omgaan, maar hoeveel doden zijn er gevallen door radio-actief afval? Het enige grootschalige ongeluk met radioactief afval is het Kyshtym disaster in de Sovjet Unie in 1957. Daar ontplofte een grote hoeveelheid opgeslagen vloeibaar nucleair afval. Lees op Wikipedia en huiver over de nonchalance. Het aantal doden wordt geschat op zeker 50 tot aan mogelijk 9000 door latere kankers. Deze ramp is geheim gehouden tot 1989. Het enige andere ongeluk met radioactief afval dat ik ken, is het Goyana incident in Brazilië. Het ging om een

afgedankte kobalt-60 bron uit een ziekenhuis die per ongeluk bij het oud-ijzer was beland. Bij het demonteren daarvan zijn vier mensen overleden.

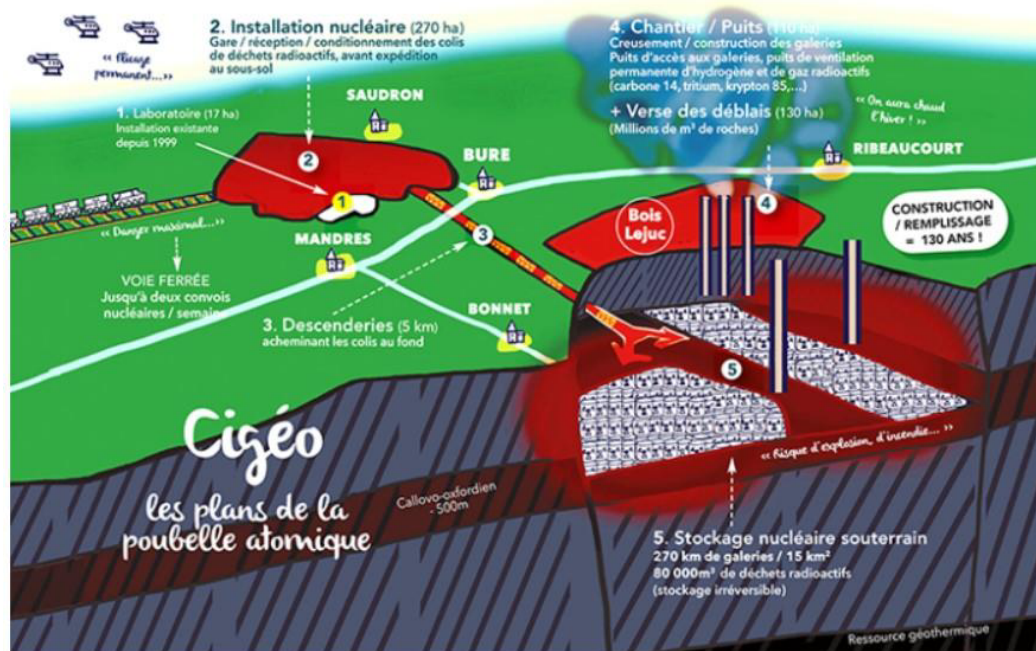
We hebben veel gehoord over de nonchalante opslag van radioactief afval in verlaten zoutmijnen in In Gorleben en Asse in Duitsland. Er was water in de zoutmijn gesijpeld en radioactief besmet geraakt. In de documenten wordt gesproken over “Salzlauge”, dat is pekewater. Uit vrees voor besmetting van grondwater zijn de vaten weer uit de mijn gehaald en elders beter opgeborgen. Denkt men nu werkelijk dat pekewater in de zoutlaag op 750 m diepte op afzienbare termijn de oppervlakte zou kunnen bereiken? Als het al ooit zou gebeuren, zal de radioactiviteit al lang verdwenen zijn. De opslagmethode in Gorleben wordt nu niet meer gebruikt. Nederland stuurt de opgebruikte splijtstofelementen uit de kerncentrales naar de opwerkingsfabriek in La Hague in Normandië. Daar wordt het hoogradioactieve afval mechanisch en chemisch gesplitst. Een deel wordt gerecycled en als bruikbare splijtstof onder de benaming MOX (Mixed Oxides) weer naar Nederland teruggestuurd. Het andere onbruikbare deel wordt verglaasd en in roestvrij stalen containers gedaan.



Bij de opslaglocatie COVRA in Borssele zijn de hoogradioactieve vaten afgeschermd door een laag beton. Je kunt er over heen lopen zonder straling op te lopen. Als je onbeschermd naast een vers gevuld vat zou gaan staan, heb

je na een minuut al een dodelijke dosis opgelopen, maar na 10000 jaar is de radioactiviteit van het verglaasde afval teruggelopen tot het niveau van natuurlijk uraniumerts. De stralingsintensiteit neemt sterk af met de afstand, op 10 m is het al 50 x minder dan op 1 m. Dat is in lucht, als er 10 m water tussen zit, is alle straling afgeschermd.

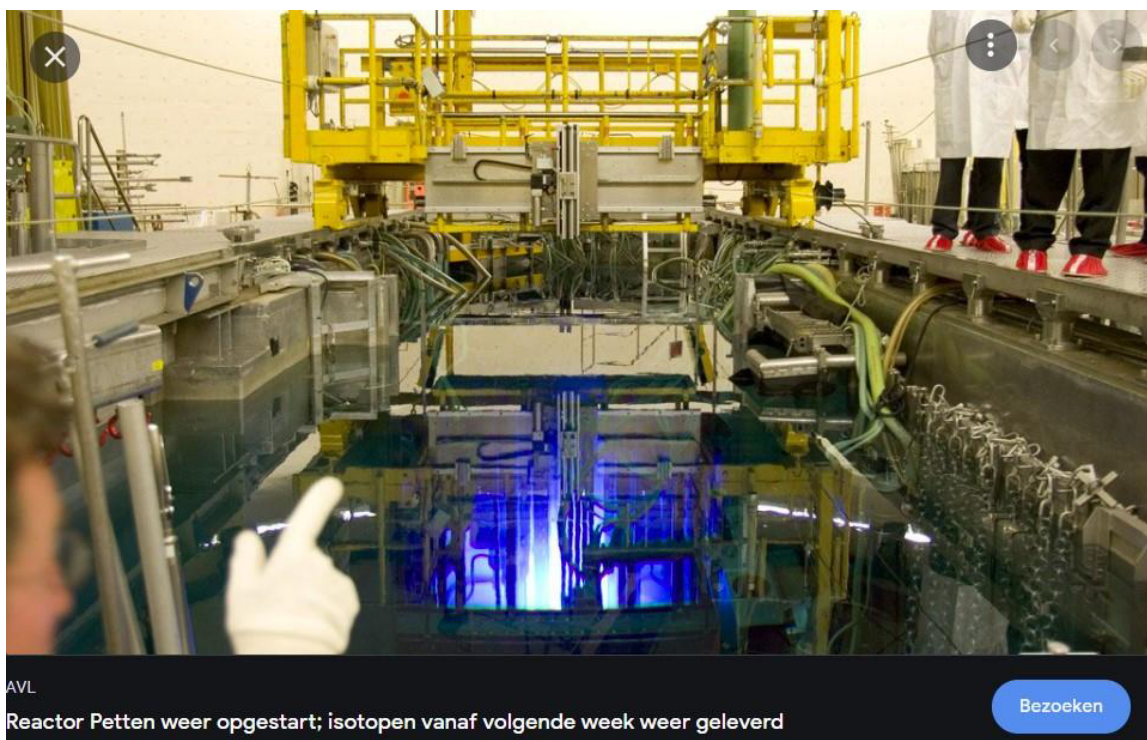
Voor de eindberging van het langlevende afval moet elk Europees land zelf zorgen. In Nederland denkt men aan Boomse klei op 400 m diepte. In Frankrijk wordt gewerkt aan ondergrondse opslag in Bure, ook in klei.



Cigéo serait réparti entre 5 villages meusiens et haut-marnais : Bure, Saudron, Ribeaucourt, Bonnet et Mandres. Ce s 270 ha d'installations nucléaires en surface et 300km de galeries souterraines à 500m de profondeur, destinées à recevoir déchets les plus radioactifs de l'industrie nucléaire. Le tout pour un coût de quelques dizaines de milliards d'euros.

Deze afbeelding van de Franse antinucleaire beweging is te bezoeken op www.bureburebure.info. Bentonietklei is heel geschikt omdat het zwelt als het nat wordt en daardoor praktisch waterondoorlatend. Het heeft een grote adsorptiecapaciteit en bindt ionen. Bentoniet wordt ook gebruikt in de cosmetica voor reiniging van de huid. Graniet is een andere mogelijkheid om het afval stabiel op te bergen. In Finland zijn de tunnels in graniet op honderden meters diepte al in gebruik genomen.

Een illustratie van hoe goed water radioactiviteit afschermt, is deze opname van de reactorkern in Petten.



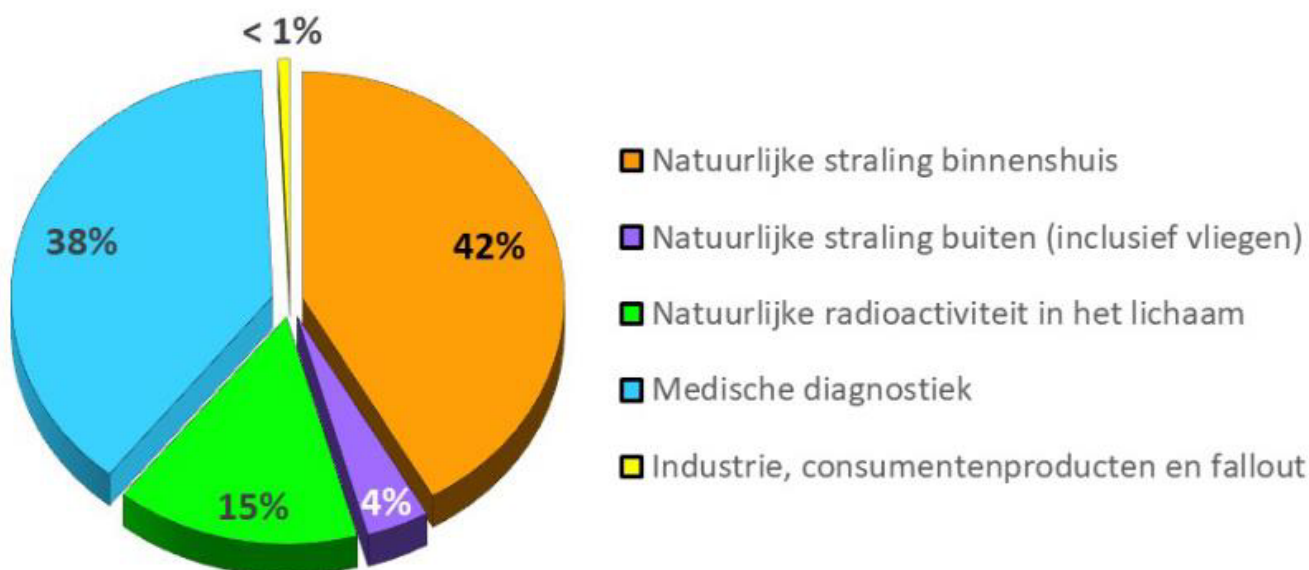
Een opname als deze is mogelijk omdat de reactor in Petten niet meer warmte produceert dan uw CV installatie. Deze reactor wordt uitsluitend gebruikt voor de productie van medische isotopen en voor onderzoek naar de effecten van neutronenbestraling op materialen. We kijken naar beneden in het bad water waar de reactorkern zich in bevindt. Het hoeft geen betoog dat de reactorkern ontzettend sterk radioactief is. Dat is ook te zien aan de blauwe straling, de Cherenkov radiation. De blauwe straling zelf is ongevaarlijk want het is zichtbaar licht. Het is afkomstig van betastraling, dat zijn snelle elektronen. Hun snelheid is groter dan de lichtsnelheid in water. Het licht dat ze uitzenden is analoog met de schokgolf van een supersone straaljager. Water schermt de straling goed af, maar gewoon grond en beton zijn nog beter.

Wat is nu de garantie dat de vaten met hoogradioactief afval op lange termijn niet kapot gaan? Die garantie is er niet, maar zo'n garantie is ook niet nodig. De radioactieve elementen zitten muurvast versmolten in het glas.



Je kunt het vergelijken met het lichtgroene uraniumglas dat in de periode van de Art Deco in de mode was. Het is echt niet zo dat dit soort glas maar een verwaarloosbaar spoortje uranium bevat, het gehalte varieerde van 2 tot 20%! Je moet er misschien niet dagelijks uit drinken, maar je kunt het rustig vastpakken en op tafel laten staan.

Dit brengt me op de vraag hoe we opgelopen straling kwantificeren en wat aanvaardbaar is. De dosis geabsorbeerde straling wordt in eerste instantie uitgedrukt in energie (Joule) per kg lichaamsgewicht, de Gray. Omdat het biologische effect afhangt van de soort straling en van het bestraalde lichaamsdeel wordt deze eenheid vermenigvuldigd met een effectiviteitsfactor, waardoor de eenheid Sievert (Sv) ontstaat. Een eenmalige dosis van 10 Sv is dodelijk. De natuurlijke achtergrondstraling in Nederland komt neer op 2 mSv/jaar.



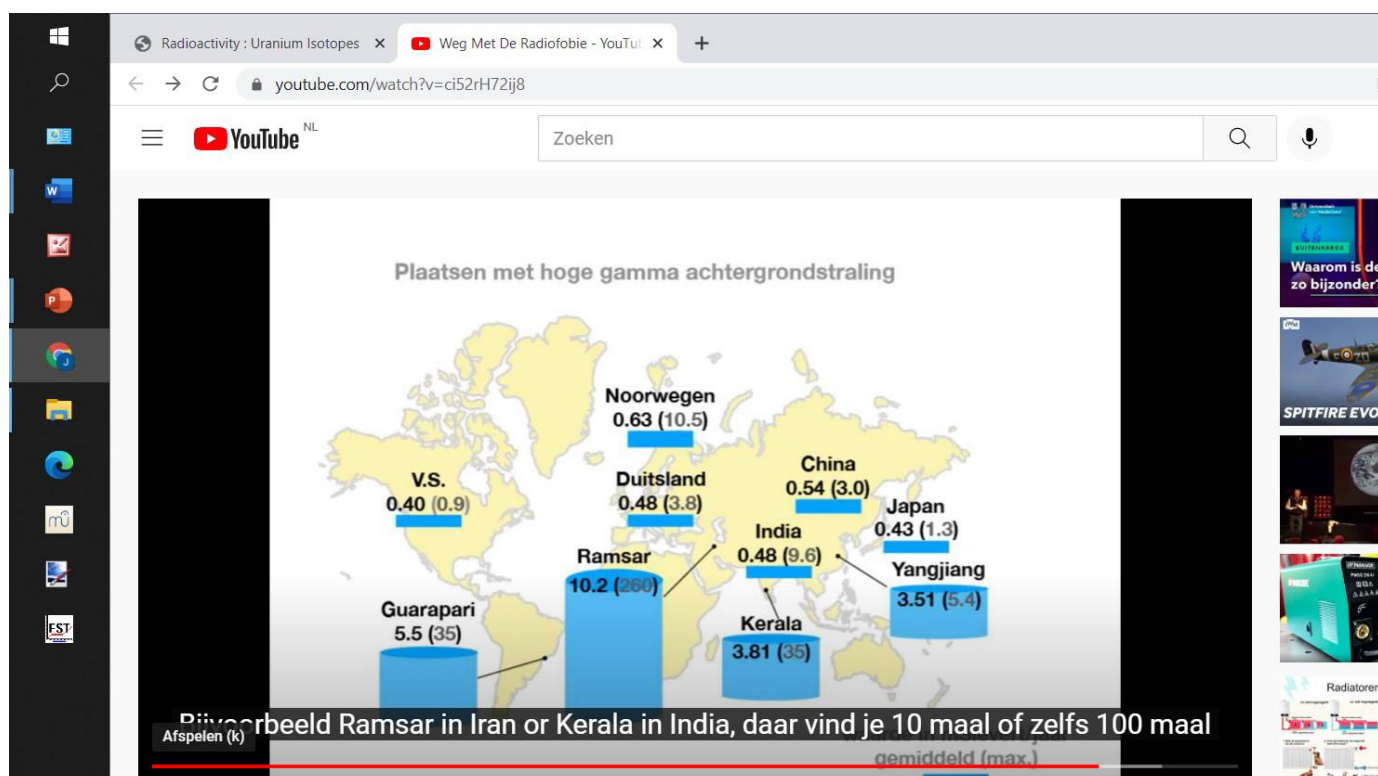
De natuurlijke achtergrondstraling komt voor een deel uit ons eigene lichaam. Ons levende weefsel bevat kalium en koolstof, waarvan een klein deel van nature radioactief is. Wist u dat er wel 6000 keer per seconde een radio-actief atoom in uw lichaam vervalst en daarbij gamma en betastraling uitzendt? Dat is hier in groen aangegeven. Verder bereikt ons kosmische straling uit het heelal, in paars aangegeven. Gelukkig wordt het grootste deel tegengehouden tegengehouden door de atmosfeer en door het aardmagnetisch veld. Dan is er de straling die uit de stenen en beton komt van onze huizen, in lichtbruin, het grootste deel van de achtergrondstraling. Deze straling is afkomstig van radon, een vervalproduct van uranium dat in vrijwel alle gesteente zit. In een houten huis heb je hier geen last van. Tenslotte stellen we ons vrijwillig in toenemende mate bloot aan medische bestraling, röntgenonderzoek, bijvoorbeeld bij de tandarts, CT- en PET scan, isotopenbehandelingen, in lichtblauw aangegeven maar dat is gemiddeld over de bevolking.

Hoeveel mogen we nu extra ontvangen zonder dat er gezondheidsschade optreedt? Er is afgesproken dat de aanvaardbare maximale extra dosis voor de bevolking 1 mSv per jaar is. De brandweer mag per inzet 2 mSv oplopen maar in het uiterste geval bij levensreddend werk éénmalig wel 750 mSv.

Medische bestraling kan per persoon heel verschillend zijn. Eén CT scan geeft ineens 10 mSv en een schildklierbehandeling geeft 50 – 70 mSv, dat is meer dan 50 keer de toelaatbare extra dosis in het algemeen. Toch is volgens de

ziekenhuizen deze dosis volkomen veilig. In een folder van het Catharinaziekenhuis staat het volgende: *Vraag: Hoe schadelijk is radioactief jodium? Antwoord: Het is volkomen veilig. Radioactief jodium 'bestraalt' de schildklier van binnen uit. Hierdoor wordt de groei van schildkliercellen geremd en worden (te snel werkende) schildkliercellen vernietigd. Zo kunnen uw klachten verdwijnen.*

Het ziekenhuis heeft gelijk dat radio-actieve straling veel minder gevaarlijk is dan algemeen wordt gedacht.



In sommige gebieden elders in de wereld is de natuurlijke achtergrondstraling veel hoger dan in Nederland, bijvoorbeeld op het strand in Guarapari in Brazilië of in Ramsar in Iran. Toch is op deze plekken geen verband gevonden tussen de natuurlijke achtergrondstraling en kankerincidentie. In de film “Weg met de radiofobie!”

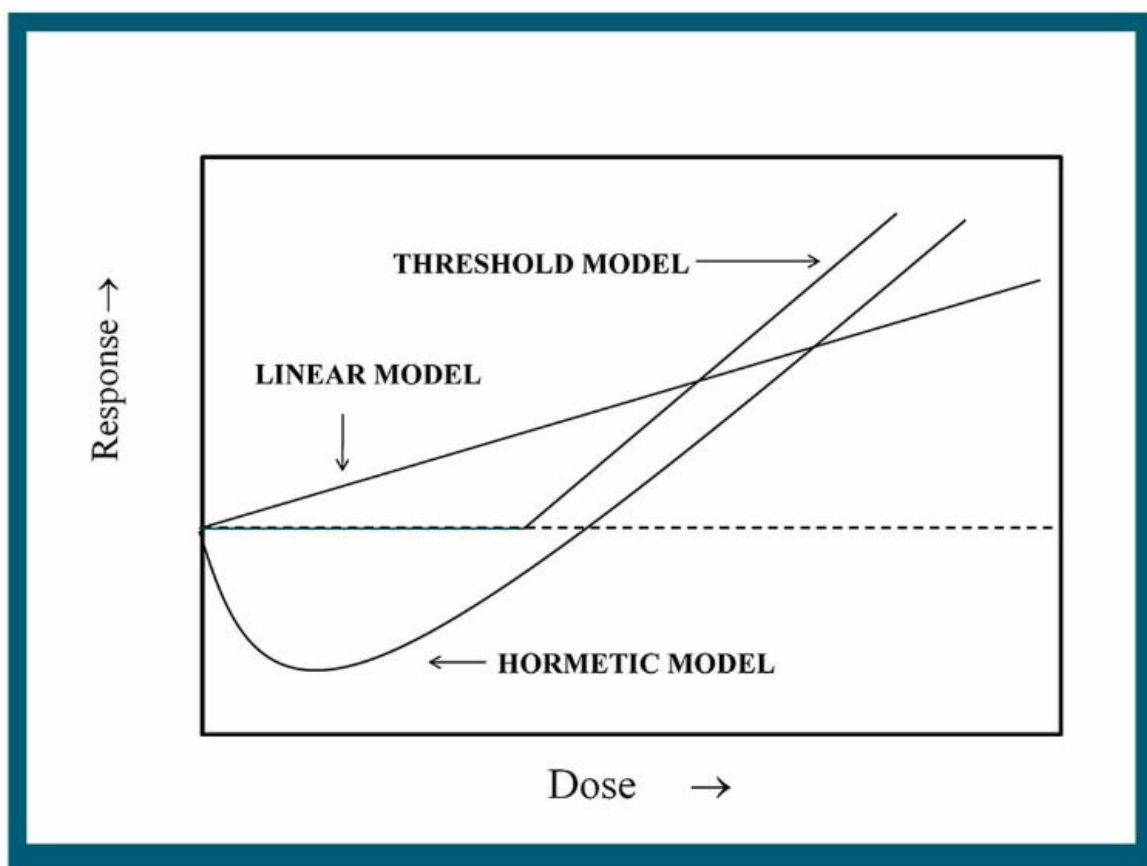
<https://www.youtube.com/watch?v=ci52rH72ij8&feature=youtu.be> zie je hoe mensen op het strand van Guarapari, Brazilië, niet alleen een zonnebad maar ook een zandbad nemen, o.a. tegen de reumatiek.

Dit alles wil niet zeggen dat radioactiviteit geen kanker kan veroorzaken, maar je hebt wel vrij hoge doses nodig die steeds weer herhaald worden om kanker te krijgen. Denk aan de radiummeisjes uit de jaren 1920-1930 (

<https://historiek.net/het-schandaal-van-de-radium-girls/153880/>).

Daartegenover komt er steeds meer bewijs dat lage doses radioactieve straling een gunstig effect op de gezondheid hebben, het zogenoemde hormetische effect., bijvoorbeeld Shizuyo Sutou, “Low-dose radiation effects” in Current Opinion in Toxicology, Volume 30, June 2022, 100329.

Het eenvoudige lineaire model, het Linear Non-Threshold of LNT model, gaat er van uit dat het risico op kanker een rechtlijnige functie is van de bestraling en dat er geen drempelwaarde is. Het gevolg is dat het totaal aantal voorspelde kankergevallen onafhankelijk is van de verdunning van de straling over miljoenen mensen.



Echter, zoals o.a. onderstaande publicatie uit 2021 aantoonst is dit LNT model gebaseerd op foutief onderzoek door de Amerikaanse Nobelprijswinnaar Herman Muller aan fruitvliegjes. De schattingen voor het totaal aantal kankergevallen na Tsjernobyl die in de miljoenen lopen zijn dan ook foutief.



Review

How self-interest and deception led to the adoption of the linear non-threshold dose response (LNT) model for cancer risk assessment

Paul B. Selby^a, Edward J. Calabrese^b  

Volgens Robert Peter Gale in “Chernobyl at 35 Years: An Oncologist’s Perspective” is er afgezien van schildklierkanker, geen bewijs dat er een toename van kanker is geweest in de nasleep van de ramp in Tsjernobyl.

In Tsjernobyl is ook geen genetische schade aangetoond die op het nageslacht wordt overgedragen (Richard Stone, “No excess mutations in the children of Chernobyl survivors, new study finds”, 22 april 2021 in Science.)

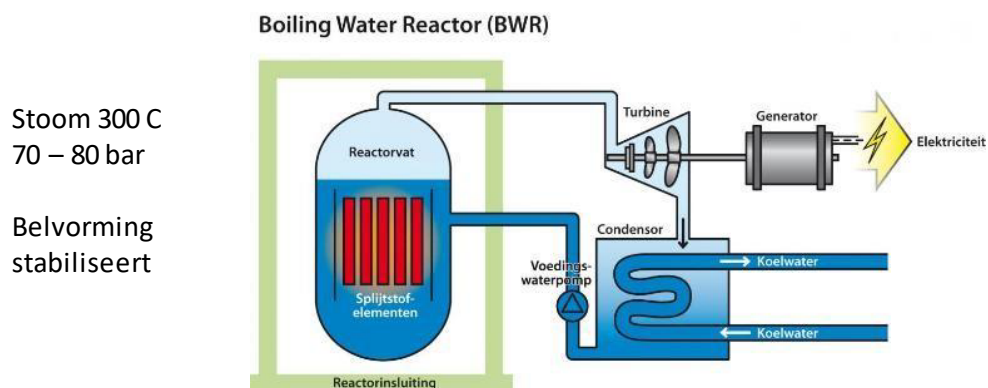
Hetzelfde geldt voor de kinderen van de overlevenden van de atoombomben op Hiroshima en Nagasaki. Er is een jarenlang een ongelooflijk uitgebreid en grondig onderzoek gedaan door de RERF, Radiation Effects Research Foundation maar een effect is er niet gevonden.

Dit wil allemaal niet zeggen dat we radioactieve straling van sterke stralingsbronnen niet moeten afschermen. Een grote dosis is wel degelijk gevaarlijk, maar het effect van radioactieve straling kan sterk verschillen in indringingsdiepte en schadelijke werking.

Nu wil ik enkele reactortypes beschrijven:

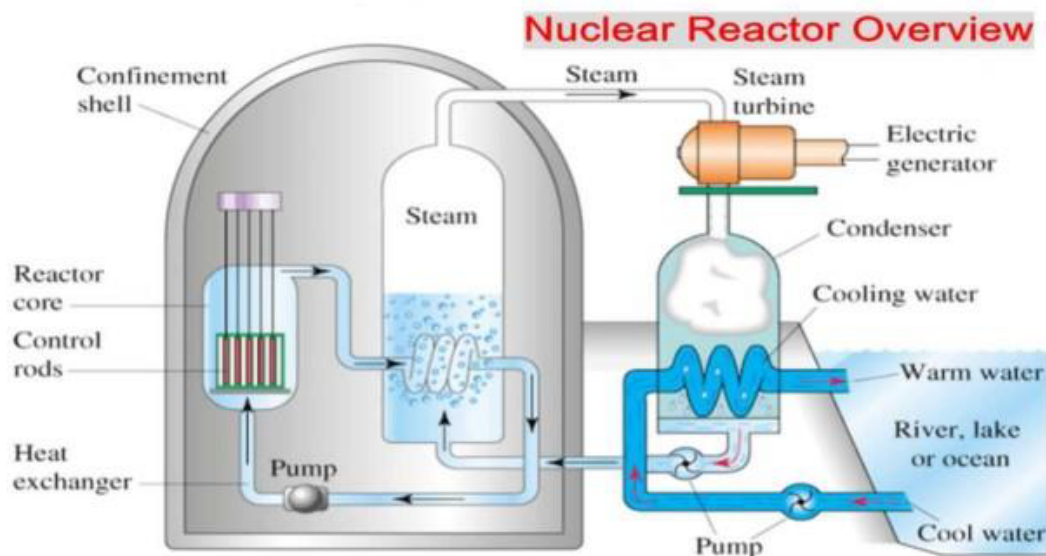
Reactor types

Het eenvoudigste type is de BWR, de Boiling Water Reactor.



In de Boiling Water Reactor is de waterdruk 70-80 bar bij een temperatuur van 300 C. De centrale in Dodewaard was van dit type. Het gebruik van de stoom voor turbine aandrijving is identiek aan dat van een kolencentrale.

Het was een kleine reactor met een vermogen van 58 MW, vele malen meer dan wat de stad Wageningen gebruikt. Het is een uitstekende investering gebleken zie <https://nos.nl/artikel/2477043-miljoenen-nodig-voor-sloop-kerncentrale-dodewaard-bij-aandeelhouders-beland>. Dit type is zeer veilig dank zij de negatieve terugkoppeling door toenemende belvorming als de temperatuur oploopt. Dan worden de neutronen minder gemodereerd oftewel vertraagd en de intensiteit van de kettingreactie neemt af. Een nadeel is de wat lagere temperatuur en daardoor wat lagere thermische efficiëntie. Het feit dat eventuele radioactiviteit van het koelwater direct bij de turbines kan komen geeft een klein risico. Dat risico is afwezig bij de PWR.



Een pressurized water reactor, zoals de EPR.
Waterdruk is 150 bar, de temperatuur is 300 C

De regelstaven zakken van boven naar beneden

Bij de PWR, de Pressurized Water Reactor, in Europa de EPR (European Pressurized Reactor) genoemd, is een scheiding aangebracht tussen het primaire circuit links en het secundaire circuit rechts. Dit verkleint het risico van radioactieve besmetting van het niet-nucleaire deel van de reactor. De druk in het vat is veel hoger dan bij de BWR, 150 bar waardoor het water ondanks de hoge temperatuur van 300 C, niet kookt. Vanwege die hoge druk is het begrijpelijk dat er soms vragen rijzen over de veiligheid. Naar aanleiding hiervan wil ik iets kwijt over het fanatisme en gebrek aan kennis bij de antinucleaire beweging.

In 2012 zijn er bij een echolocatie onderzoek aan de wand van het reactorvat in Doel en Tihange kleine waterstofvlokken gevonden.

Deze vlokken zijn een eigen leven gaan leiden onder aanduiding van "scheuren". In februari 2018 had ik een ingezonden brief naar dagblad Trouw gestuurd die tot mijn verbazing geplaatst werd. De teneur van mijn artikel was dat het risico van kernenergie systematisch wordt uitvergroot in verhouding tot andere risico's in onze samenleving. De volgende week al stond er een reactie in Trouw van Els de Groen, voormalig Europarlementariër van Groen Links. Zij schreef o.a. "Het wordt tijd een eind te maken aan de demagogie van atoomlobbyisten

als emeritus hoogleraar Jan Goudriaan.” Verder schreef ze “In Doel, Tihange en Borssele staan centrales van veertig jaar oud. In diverse reactorvaten zitten duizenden scheuren, zogeheten waterstofvlokken”.

Het gebruik van de term “scheuren” is louter demagogie! Wat is er aan de hand? De wand is meer dan 20 cm dik en bestaat uit speciaal gewalst staal. Staal bevat na de fabricage altijd hele kleine waterstofbelletjes, de waterstofvlokken. Door het walsen tot een plaat worden die belletjes platgedrukt waardoor ze evenwijdig lopen aan het oppervlak en dus ook evenwijdig aan de trekspanning in de wand van een vat. Daarom leveren ze geen enkel gevaar op, denk maar aan een met touw omwikkelde vaas. Het touw is in de lengterichting één en al scheur!



De touwomwikkeling zit vol met “scheuren” en kan de tangentiële rekspanning toch goed opvangen.

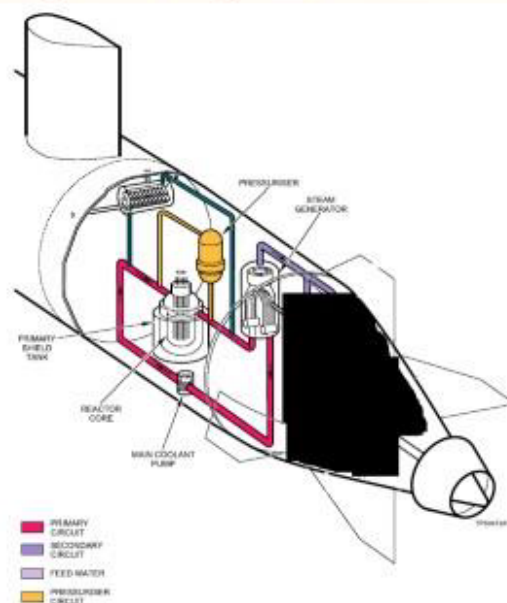
Small Modular Reactors (SMR's)

Onlangs werd in de TV documentaire Focus over kernenergie beweerd dat kleine kernreactoren nog nergens zouden werken. Dit is onjuist. Het vermogen van de kernreactoren van nucleaire onderzeeërs ligt in de orde van 50 – 150 MW, het zijn dus kleine reactoren. Het zijn juist de eerst ontwikkelde reactoren waarop de latere civiele reactoren gebaseerd zijn. Zij zijn ontwikkeld in de VS

onder leiding van admiraal Rickover en in 1953 in gebruik zijn genomen (in de Nautilus). In feite zijn het kleine PWR's . Tijdens de hele levensduur van de onderzeeër is geen brandstofwissel nodig. Dit is mogelijk door gebruik te maken van "burnable neutron poison" , borium of gadolinium verbindingen. De afbraak hiervan compenseert de achteruitgang door de geleidelijke aanmaak van neutronen absorberende splijtingsproducten en/of bestralingsproducten in de reactorwand.

Schematic of Reactor and Propulsion Systems

- Nuclear submarines are powered by Pressurised Water Reactors (PWRs)
- They are very similar in function to standard civil power generation PWRs
- PWRs use water for the coolant and the moderator
- Heated water leaves the reactor vessel and travels via pipework to a heat exchanger, Steam Generator. It then returns to the reactor vessel.

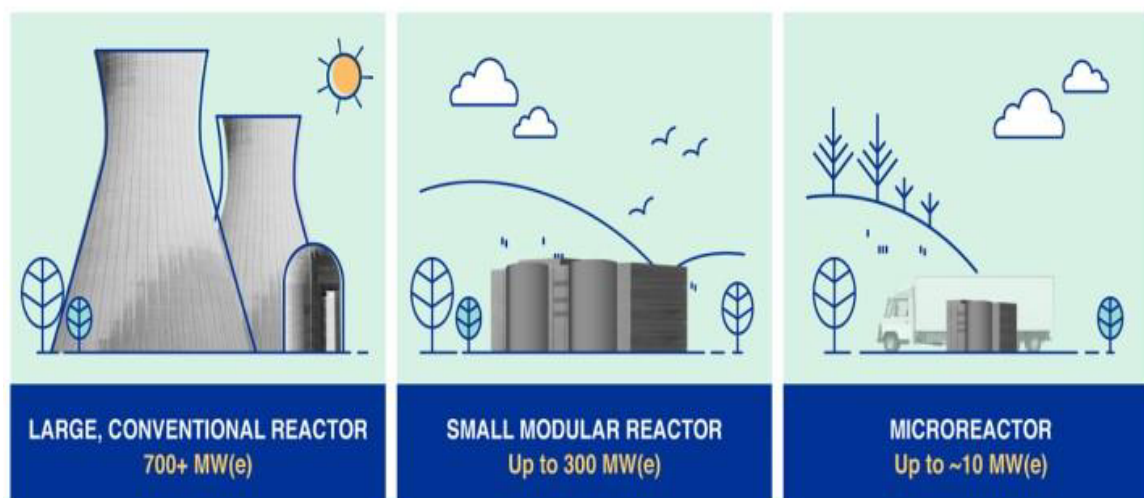


De bemanning van een onderzeeër wordt natuurlijk gecontroleerd op stralingsbelasting en het opmerkelijke feit is dat zij tijdens operationeel gebruik minder straling oplopen dan u en ik. De reactor is natuurlijk heel goed afgeschermd, maar bovendien zijn twee alledaagse bronnen in een onderzeeër afwezig : kosmische straling en radon. Je zou kunnen denken dat uit een kleine kernreactor meer neutronenstraling ontsnapt vanwege de hogere oppervlakte/volumeverhouding. In principe zou dit wel zo kunnen zijn en dit detail is in een rapport aan de provincie Overijssel benadrukt, helaas met het gevolg dat de provincie heeft afgezien van de plannen voor een kernreactor. De

relatief grotere neutronenstraling levert bij goede afscherming geen enkel risico op, zoals de ervaring met de nucleaire onderzeeërs bewijst.

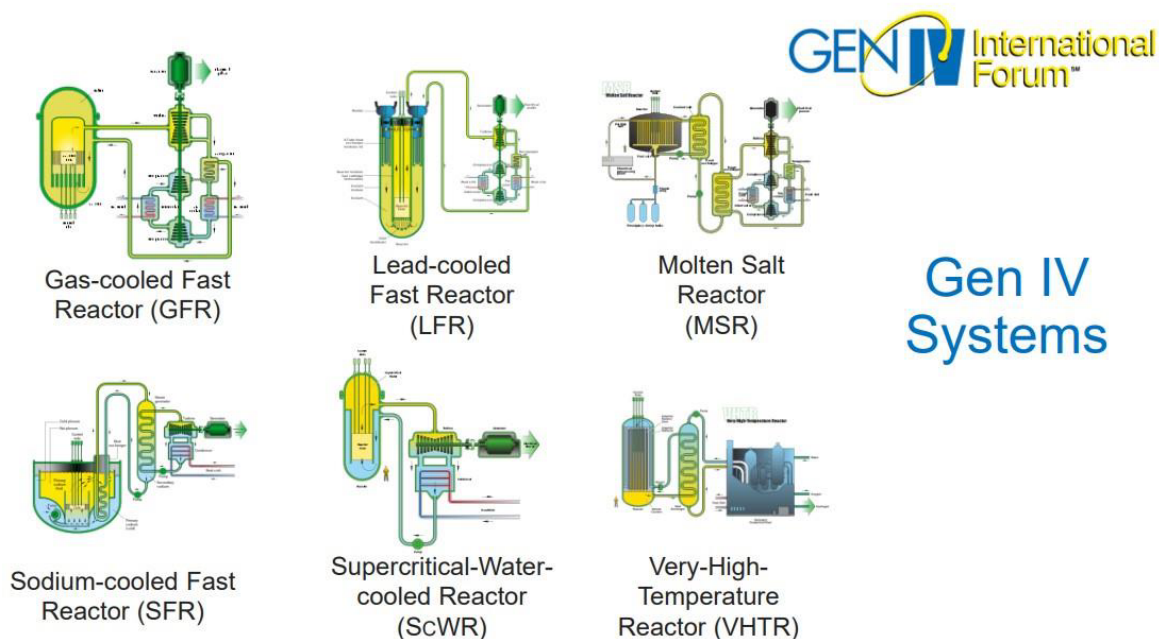
Er worden momenteel in de wereld tientallen kleine reactoren ontwikkeld, zie <https://www.kernvisie.com/innovatie/kleine-en-middelgrote-kernreactoren.html> en [ARIS - Home \(iaea.org\)](https://www.iaea.org/ARIS), of https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_small_modular_reactor_designs.

De ACP100 in China is een voorbeeld of de CAREM in Argentinië.



Bij grote reactoren staat vaak een koeltoren, maar dat is aan de kust of aan een estuarium zoals bij Borssele natuurlijk niet nodig. Bij een rivier loop je al gauw tegen watertekort op. Dan moet je ofwel een kleine centrale nemen zoals in Dodewaard gedaan is, ofwel voor een grote centrale een koeltoren neerzetten. In een koeltoren wordt het water verdampt, zodat je met veel minder water toekan. Overigens is er in dit opzicht geen verschil tussen een kerncentrale of een fossiele centrale. Beide hebben grote hoeveelheden koelwater nodig.

Wat moeten we nu? Wachten op de betere Generatie IV reactoren waarvan er hier een aantal zijn afgebeeld?



5

Deze reactoren zijn op sommige punten wel beter of hebben nieuwe mogelijkheden maar ze zijn nog niet beschikbaar. De Nederlandse regering heeft een rapport laten maken door KPMG dat in juli 2021 ter beschikking is gekomen. Dit rapport “Nuclear Energy Market Consultation” zegt het volgende:

There is no consensus on which design is the best; the market participants consider all of the Generation III+ reactors listed above to be sound options

- The market participants expressed preferences for various specific designs, while stating that all of the designs by EDF, Westinghouse, KEPCO and Rosatom are robust designs.
- If a Generation III+ design is seriously considered, it will be necessary to work out which of the designs is most suitable for the Netherlands. The obvious options are the EDF, Westinghouse and KEPCO designs.
 - At the request of the Ministry of Economic Affairs and Climate Policy Rosatom has been deemed out of scope, as have the Chinese reactor technologies.

A choice can only be made once a sufficient number of projects have actually been completed

- It is expected that by 2023, enough nuclear power plants of all types will have been built to enable a choice to be made between proven designs.



“There are no good or bad designs. The key thing is that the more power plants you build, the lower the risks. That’s what keeps the costs down.”

Nu, twee jaar later, heeft Nederlandse regering het advies van KPMG in zoverre ter harte genomen dat men niet wil wachten op generatie IV reactoren. Voor

de keuze van de nieuwe reactoren wil de regering kijken naar de volgende types.

1) [BWRX-300](#); 2) [NuScale](#); 3) [NuWard](#); 4) [Rolls-Royce SMR](#).

1) De BWRX-300 is een kleine modulaire boiling water reactor, die GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) ontwerpt. Estland heeft dit type al uitgekozen. De eenheidsgrootte is 300 MWe. De "X" in de naam slaat op de tiende generatie kokendwaterreactor, die General Electric sinds 1955 heeft ontwikkeld. Ook Dodewaard (58 MWe) was een reactor van General Electric en heeft van 1969 tot 1997 gedraaid. Het was wel zo dat Nederlandse bedrijven de meeste onderdelen hebben gemaakt. In die periode kreeg Dodewaard vaak een prijs van General Electric vanwege zijn uitzonderlijk hoge beschikbaarheid. Kenmerkend en uniek voor Dodewaard was, dat hij een schoorsteen boven zijn reactorkern bezat om de koelmiddelstroom door natuurlijke circulatie aan te drijven. Bijna alle latere generaties kokendwaterreactoren van General Electric hadden hiervoor recirculatiepompen. Voorts had Dodewaard ook een noodcondensor om in noodsituaties de nawarmte van de reactor aan een waterbassin af te geven. Deze twee componenten, schoorsteen en noodcondensor, bezit ook de BWRX-300. De koeling van de kern van deze reactor is eveneens met natuurlijke circulatie. GEH claimt dat vanwege deze twee eigenschappen de reactor passief veilig is. Er kan geen groot koelmiddelverliesongeval plaatsvinden en ook geen kernsmelten. Een ongeval als in Fukushima is uitgesloten, omdat vanwege de noodcondensor de reactor zichzelf gedurende een week koel houdt. Na die week moet alleen het bassin bijgevuld worden.

2) NuScale is een Amerikaans bedrijf, dat een integrale kleine modulaire drukwaterreactor (SMR) heeft ontwikkeld. De reactor heet VOYGR en zijn eenheidsgrootte is 77 MWe, maar er kunnen er twaalf modules op één ponton worden gezet zodat een reactor van 924 MWe resulteert. De modules worden seriematig in een fabriek gebouwd. Eind oktober is bekend geworden dat datacentra in de staten Ohio en Pennsylvania er elk één hebben besteld. De planning is dat beide centrales over 6 jaar, dus in 2029 al klaar zijn. Het woord "integrale" betekent, dat het hele primaire systeem, de reactorkern met daarboven de stoomgeneratoren en de drukgenerator, in een lang en slank reactorvat is geplaatst. De warmteoverdracht uit de kern naar de stoomgeneratoren vindt plaats met natuurlijke circulatie, dus er is geen pomp die zou kunnen uitvallen. De eenheden van een centrale staan naast elkaar in een ondergronds bassin, dat gevuld is met water.. Dat maakt de kwaliteitscontrole relatief eenvoudig. De bouw van een groot aantal eenheden, die tezamen een kerncentrale vormen, is een vorm van serieproductie en verlaagt de kosten. De reactoren zijn geschikt voor zowel de productie van elektriciteit, als voor stadsverwarming. Door al deze factoren is de flexibiliteit van zo'n centrale met meerdere eenheden beter dan die van een grote conventionele kerncentrale.

3) De Franse SMR heet NuWard. Dat is afgeleid van NUClear ForWARD. Het Franse elektriciteitsbedrijf EDF is de trekker van het project, waarin ook de overheidsorganisatie Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), de vennootschap TechnicAtome en het militaire constructiebedrijf Naval Group participeren. NuWard is een integrale drukwaterreactor. De reactorkern, de stoomgeneratoren en de drukgenerator bevinden zich binnen het reactorvat. De veiligheidsomhulling bevat

het reactorvat, de koelmiddelpompen en de veiligheidssystemen. Ze heeft de vorm van een metalen capsule. De veiligheidsomhulling is omgeven door water. De reactor heeft een respijtp periode, dat is de maximale tijd dat de operateur na een ernstig ongeluk niet hoeft in te grijpen, van drie dagen. Kenmerkend is het kleine volume van de reactor ten opzichte van het relatief grote vermogen. Een NuWardcentrale bestaat uit twee eenheden, die elk 170 MWe ofwel 540 MWth leveren. De stalen veiligheidsomhulling is 16 meter hoog. Ter vergelijking: De Amerikaanse SMR met integrale drukwaterreactor, NuScale, levert 60 MWe en heeft een veiligheidsomhulling van 23 meter hoog. Tussen de twee reactorkamers van de Franse centrale bevindt zich het splijtstofopslagbassin. De plaatsing van de reactorkamers is net ondergronds. Boven de reactorkamers en net bovengronds is een inrichting aanwezig voor splijtstofwisselen. Dat is elke twee jaar nodig. NuWard draait op lichtverrijkt uranium met een verrijkingsgraad van maximaal 5%. De kans, dat kernsmelten optreedt, is kleiner dan eens in de honderdduizend jaar. Als dat onverhoopt toch zou gebeuren, dan beschikt NuWard over een kernopvanginrichting, zodat de gesmolten kern niet door de fundering heen kan dringen. De bouw tijd is drie jaar.

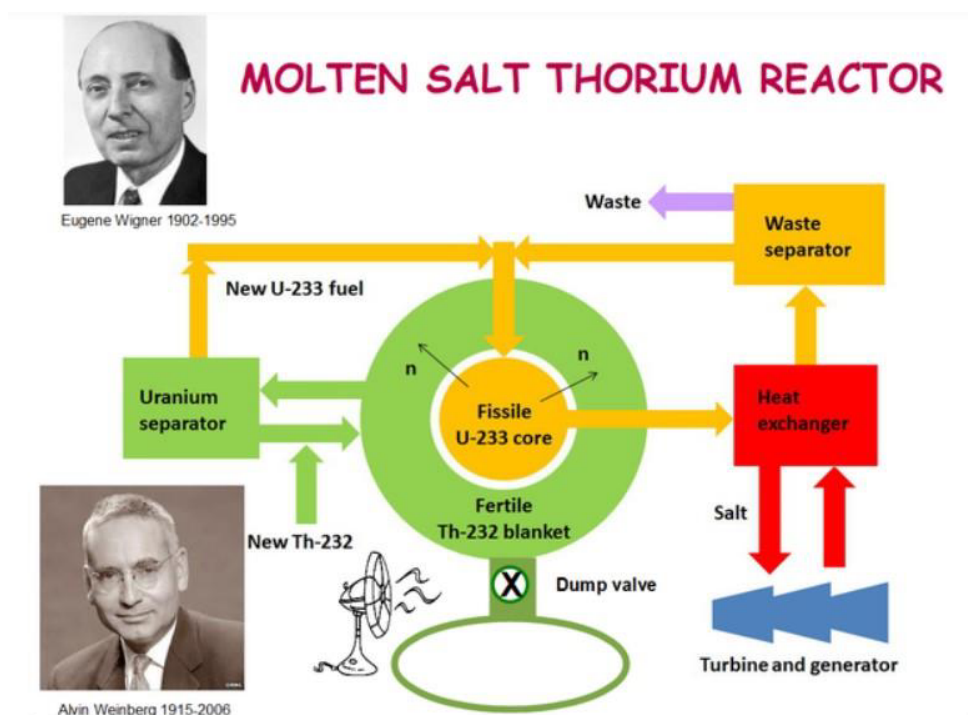
4) Rolls-Royce is de producent van reactoren voor de Engelse kernonderzeeërs. Deze kernreactoren bouwt en onderhoudt Rolls-Royce al tientallen jaren. Het bedrijf besloot om zijn deskundigheid op dit gebied aan te wenden voor de ontwikkeling van een kleine modulaire drukwaterreactor. Daartoe geeft het leiding aan een consortium van een achttal voornamelijk Engelse bedrijven. Het is de grootste samenwerking op het gebied van de energietechniek, die Engeland ooit gezien heeft. Grote ingenieursbureaus, die bekend zijn met de reactortechniek, participeren. Het ontwerp is op hoofdlijnen gereed. De desbetreffende SMR heeft een vermogen van 470 MWe. Dat is iets groter dan de bovengrens van 300 MWe, die IAEA hanteert voor een SMR. De reactor heeft drie circulatieleidingen met drie stoomgeneratoren schuin boven het reactorvat. Daarnaast in het primaire systeem nog de drukgenerator. Het is dus een kleine uitvoering van een gewone drukwaterreactor, wat de kans op onaangename verrassingen verkleint. Nieuw is, dat het ontwerp geheel modulair is. De productie van alle modules vindt in fabrieken plaats, hetgeen de kwaliteit van de onderdelen zeer ten goede komt. Het transport gaat over de weg in containers. Het samenvoegen van de modules is veel efficiënter dan die van de losse componenten bij grote conventionele kerncentrales. Het vindt bovendien plaats onder een overkapping, zodat het werk geen last heeft van slecht weer. De reactor is gedeeltelijk ingegraven en steekt niet ver boven het landschap uit. Er is een dijk voorzien rondom de centrale, die deels bestaat uit de weggegraven grond. Die dijk beschermt de centrale tegen invloeden van buiten af, zoals een neerstortend vliegtuig. Voorts is de dakconstructie innovatief. Ze bestaat uit een aantal facetten, in plaats van de bekende koepel. Ten opzichte van een eerdere versie van het ontwerp is het vermogen iets verhoogd van 440 naar 470 MWe. Voorts is de technische levensduur zestig jaar en het Engelse eigen aandeel in de bouw 80%.

Op 13 november 2023, publiceerde KernVisie het volgende bericht:

De drie leveranciers, die door de regering zijn uitgenodigd om offertes te maken voor de uitbreiding van de kerncentrale in Borssele met twee eenheden van ongeveer 1000 MWe, hebben ook geoffreerd voor de vijfde eenheid in Dukovany (Tsjechië). Het betreft de Franse

We zien hier een diagram met actiniden. Hoe donkerder, hoe langer de halfwaardetijd. Hoewel dit afval, zoals ik eerder heb besproken, veilig kan worden opgeborgen, is er een betere oplossing. Dat is waar de MSR, de gesmolten zoutreactor met thorium zijn intrede doet.

Dia 64 In de VS heeft vanaf 1965 tot 1969 in het Oakridge National Laboratory een experimentele MSR gedraaid die uitvoerbaarheid van een MSR met thorium heeft aangetoond. Zie: https://en.wikipedia.org/wiki/Molten-Salt_Reactor_Experiment.



De reden dat men niet op deze lijn is verder gegaan, ligt in de enorme voorsprong van de technologie van de uraniumreactor. Ook werd gedacht dat de snelle kweekreactor met vloeibaar natrium snel operationeel zou zijn. Zoals in Kalkar is gebleken is dat niet gebeurd. Daarom zou hervatten en intensiveren van onderzoek aan de thorium MSR wenselijk zijn.

Het grote voordeel van thorium is dat het twee stappen lager staat in het periodiek systeem en daardoor een factor 1000 minder actiniden oplevert!

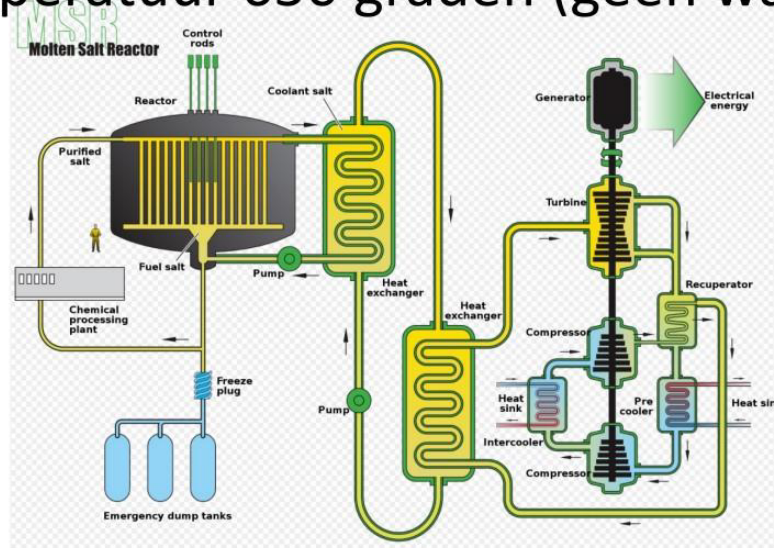
Een ander groot voordeel is dat de voorraad mijnbaar thorium in de wereld groter is dan die van uranium en ook nog eens meer over de wereld gespreid is.

Er zijn echter technische problemen met de MSR zoals de corrosie van de metalen onderdelen en de continue afvoer van splijtproducten. Deze problemen zijn niet fundamenteel van aard en kunnen ongetwijfeld worden opgelost.

Zo is het probleem van de continue afvoer van de splijtproducten waarschijnlijk opgelost in de MOLTEX reactor zoals te zien is in een filmpje van Dirk van de Voorde.

(https://www.youtube.com/watch?v=wsL36xgTpfk&ab_channel=DirkVandeVoorde). In die reactor wordt een scheiding aangebracht tussen de splijtstof in buizen en de bulk van het gesmolten zout dat dient voor de warmte uitwisseling. De geometrie lijkt dus op die van de EPR, met dit verschil dat de splijtstof niet vast is maar vloeibaar en dat de warmte wordt getransporteerd door vloeibaar zout en niet door water. De bulk van het gesmolten zout hoeft niet gereinigd te worden. De splijtproducten blijven in de buizen die gemakkelijk te verwisselen zijn.

Generatie IV- Gesmolten Zout Reactor (thorium) Temperatuur 650 graden (geen water!)



Brandstof wordt rondgepompt in zoutoplossing

Het zout in een MSR is fluoridezout, lithium-berylliumfluoride met daarin uraniumfluoride of thoriumfluoride, dus splijtstof en warmtetransportmiddel zijn gemengd. Omdat het geen water bevat kan de temperatuur veel hoger worden dan in de standaard reactor met water, hetgeen een voordeel is voor eventuele directe toepassing van de warmte in industriële processen. Het zout

verdampt niet en er is dus geen overdruk! Daardoor is de MSR nóg veiliger dan de reactoren met waterkoeling. Omdat het gesmolten zout sterk uitzet bij stijgende temperatuur heeft het een intrinsieke terugkoppeling waardoor de reactor “load following” is. De regeling is dus automatisch en gegarandeerd door de natuurwetten. Mocht er ondanks alles toch iets mis gaan en de stroomvoorziening ophoudt, dan smelt de bevroren prop onder het vat en loopt het gesmolten zout naar een opvangvat waar de kettingreactie vanzelf ophoudt door de uitspreiding over het grote oppervlak.

Deze voordelen ten opzichte van de standaard kernreactoren met uranium brengen sommigen er toe te bepleiten om nog even te wachten met de nieuwe kerncentrales totdat de thorium reactor beschikbaar is. Dat is naar mijn mening onverstandig. We moeten de bouw van nieuwe kerncentrales op basis van uranium niet uitstellen. Dan zou het betere de vijand van het goede worden. De thorium reactor komt er wel en zal te zijner tijd ook de langlevende actiniden kunnen versplijten. We hebben ruimte genoeg om in afwachting van de operationele thoriumreactor dit afval nog tientallen jaren op te slaan.

Om nog eens samen te vatten:

KE is vrijwel klimaatneutraal.

KE spaart natuur, landschap en milieu omdat het heel weinig ruimte vraagt.

KE heeft het minste materiaalgebruik per kWh.

KE garandeert continue levering van elektriciteit en warmte.

KE geeft geopolitieke onafhankelijkheid.

KE is goedkoop.

KE kan snelle wisselingen in stroomvraag volgen.

KE is veilig.

KE geeft de minste afval.

Met KE kun je veel sneller elektrisch vermogen bijbouwen dan met zonnepanelen of windturbines.

Waar wachten we op?

Tip 1: Neem de Atoom Alliantie als uw energieleverancier. Gegarandeerde atoomstroom! En het is zeker niet duurder.

Tip 2: Word lid van de Atoom Coöperatie en werk mee aan de financiering van nieuwe kerncentrales.

Literatuur:

1 J. Goudriaan, 2019: [Too much fear for radioactive contamination of seawater | Europhysics News](https://doi.org/10.1051/ePN/2019102)
<https://doi.org/10.1051/ePN/2019102>

2 J. Goudriaan, 2023: Comment on “Low-cost solutions to by M. Z. Jacobson et al., [https://DOI: 10.1039/d2ee03680k](https://doi.org/10.1039/d2ee03680k)

3 <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>

V. Smil, Energy and Civilization, MIT Press, 2018

Post about Gemini windpark, <https://www.geminiwindpark.nl>, accessed September 28, 2022

Wind energy on land, <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70960NED/table>, June 21, 2022

N. Sönnichsen, Forecast global green hydrogen projects’ retail prices, October 27, 2021, <https://www.statista.com/>

Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Lifecycle Assessment of Electricity Sources, 2022, https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf

E. J. Calabrese, Environ. Res., 2021, 197, 111025

R. Hargraves and R. Moir, Am. Sci., 2010, 98(4), 304

<https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>

<https://www.lowcarboncontracts.uk/cfds/hinkley-point-c>. 15

<https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy> levelized-cost-

Aanbevolen literatuur:

Frits Robert Bogstra: “Kernenergie Hoe zit dat”, 2013, Betatext, Bergen NH

Joshua Goldstein en Staffan Quist: “Een schone toekomst”. 2019, Atlas Contact, Amsterdam

Rauli Partanen en Janne Korhonen: “Kernenergie als kans”. 2019, Nieuw Amsterdam

Alain Bécoulet: “Kernfusie, De droom van de zon in een doosje”. 2019, Veen Media, Amsterdam

Adam Higginbotham: “Nacht in Tsjernobyl”. 2019, Ambo, Amsterdam

Maarten van Andel: “Kieswijzer Klimaat”. 2023, Blauwburgwal, Amsterdam

Marco Visscher: “Waarom we niet bang hoeven te zijn voor kernenergie”. 2022, Nieuw Amsterdam,

Voor de gevorderde:

Colin Tucker: "How to drive a nuclear reactor", 2019, Springer Praxis Books