

Radioactief wonderspul geeft voor **DUIZENDEN JAREN ENERGIE**

In de jaren 2030 zullen thorium en gesmolten zout 'foolproof' kernenergie opleveren. Nieuwe reactoren zijn extreem efficiënt en produceren een minimum aan radioactief afval.

Thorium vernieuwt de kernenergie



HEDEN

Reactoren voegen thorium aan hun brandstofstaven toe.



OVER 15 JAAR

Gesmoltenzoutreactoren met een schil van thorium zien het daglicht.



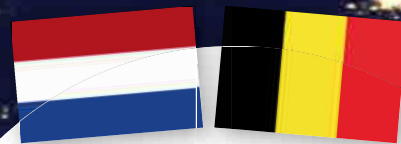
TOEKOMST

Opgehoopt kernafval wordt verbrand en onschadelijk gemaakt.

Thorium kan makkelijk stroom voor heel Europa leveren en maakt steenkool overbodig.

SHUTTERSTOCK

Thorium komt in de kernreactor van de vierde generatie.



20,5 TON THORIUM

dekt een jaar stroomverbruik in Nederland en België van 180 TWh - terwijl daar **5137 ton uranium** voor nodig zou zijn.

THORIUM-
VERBRUIK

URANIUM-
VERBRUIK

GENERATIE 1:

Kleine prototypen wekten de eerste stroom op

JAREN 1950 De reactor viel na een ramp in Groot-Brittannië in ongenade, waarbij het grafiet rond de brandstof in brand vloog en er radioactieve uitstoot was.

GENERATIE 2:

Huidige kerncentrales zijn lichtwaterreactoren

HEDEN De reactortank zit vol water, dat neutronen van de kernsplijtingen afremt. Stoom van het kokende water drijft de stroomopwekkende turbines aan.

GENERATIE 3:

Meer beveiliging tegen radioactieve uitstoot

2018 De Finse Olkiluoto 3 is de veiligste kerncentrale ter wereld. Om de reactortank zit een 2,6 m dikke betonnen schil, die bestand is tegen een luchtaanval.

GENERATIE 4:

Reactor draait op thorium en gebruikte kernbrandstof

2030 Gesmoltenzoutreactoren en hogetemperatuurreactoren winnen terrein. De laatste kunnen eind jaren 2020 goedkope stroom leveren. Gesmoltenzoutreactoren, die op thorium en kernafval draaien, nemen het risico op radioactieve uitstoot weg.

De temperatuur en druk in de reactortank stijgen. Normaal gaan er in de controlekamer van de kerncentrale in zo'n geval rode lampjes branden en alarmbellen rinkelen, en moeten operators direct ingrijpen om de kettingreacties te stoppen, zodat de reactortank niet ontploft. Maar nu schrijven we de jaren 2030, en de operators kijken er niet van op.

De nieuwe gesmoltenzoutreactor dempt de kernsplijtingen en laat de temperatuur dalen, zonder dat iemand in actie hoeft te komen. Er is zelfs geen paniek als de stroom uitvalt, zoals toen de Japanse kerncentrale in Fukushima door een aardbeving en een tsunami werd getroffen. Het hete zout in de reactortank laat een bodemstop smelten en glijdt in grote opslagtanks onder de grond. Het zout met de opgeloste kernbrandstof verspreidt zich zozeer dat de kettingreacties in die brandstof vanzelf stoppen.

De gesmoltenzoutcentrale is een kip met gouden eieren die duizenden jaren veilige, effectieve kernenergie mogelijk maakt.

Zout en thorium zijn onuitputtelijk

De nieuwe reactoren zijn ideaal om thorium te verbranden, en een schier onuitputtelijke energiebron aan te boren. Thorium is zelf

niet te splijten, maar kan in een reactor via neutronenbestraling worden omgezet in het splijtbare uranium-233. Thorium verbrandt in een gesmoltenzoutreactor zeer efficiënt in vergelijking met huidige kerncentrales, die maar 6,5 procent uranium verstoken.

De nieuwe reactoren kunnen alle energie uit thorium benutten, en verbruiken dan ook stukken minder brandstof. Een normale kerncentrale met een vermogen van 1000 MW jaagt er jaarlijks 35 ton verrijkt uranium doorheen, gemaakt van 250 ton uranium uit mijnen, maar een gesmoltenzoutreactor met dezelfde elektriciteitsproductie kan toe met 1 ton gewonnen thorium. Daardoor is er ook veel minder radioactief afval. Bovendien zal het afval van thorium slechts 300 jaar hoogradioactief zijn, terwijl de gebruikte brandstof van de huidige kerncentrales wel 100.000 jaar moet worden opgeslagen.

Wereldwijd zijn de thoriumreserves drie tot vier keer zo groot als de uraniumreserves – en door het lage brandstofverbruik kan thorium de aarde duizenden jaren voorzien van energie, terwijl de uraniumreserves nog maar een paar eeuwen meegaan.

Thorium wordt al toegepast

Thorium komt van nature in de bodem voor en is een zwak radioactief, zilverglanzend

metaal dat weinig kwaad kan. Het is op alle continenten te vinden, en de interesse in winning ervan is uiteraard het grootst in landen die over flinke reserves beschikken.

Zo zijn het Noorse bedrijf Thor Energy en het instituut voor energietechniek bij Oslo keramische brandstofstaven met thorium aan het ontwikkelen en testen, om toe te »

90
Th
Thorium
232,038

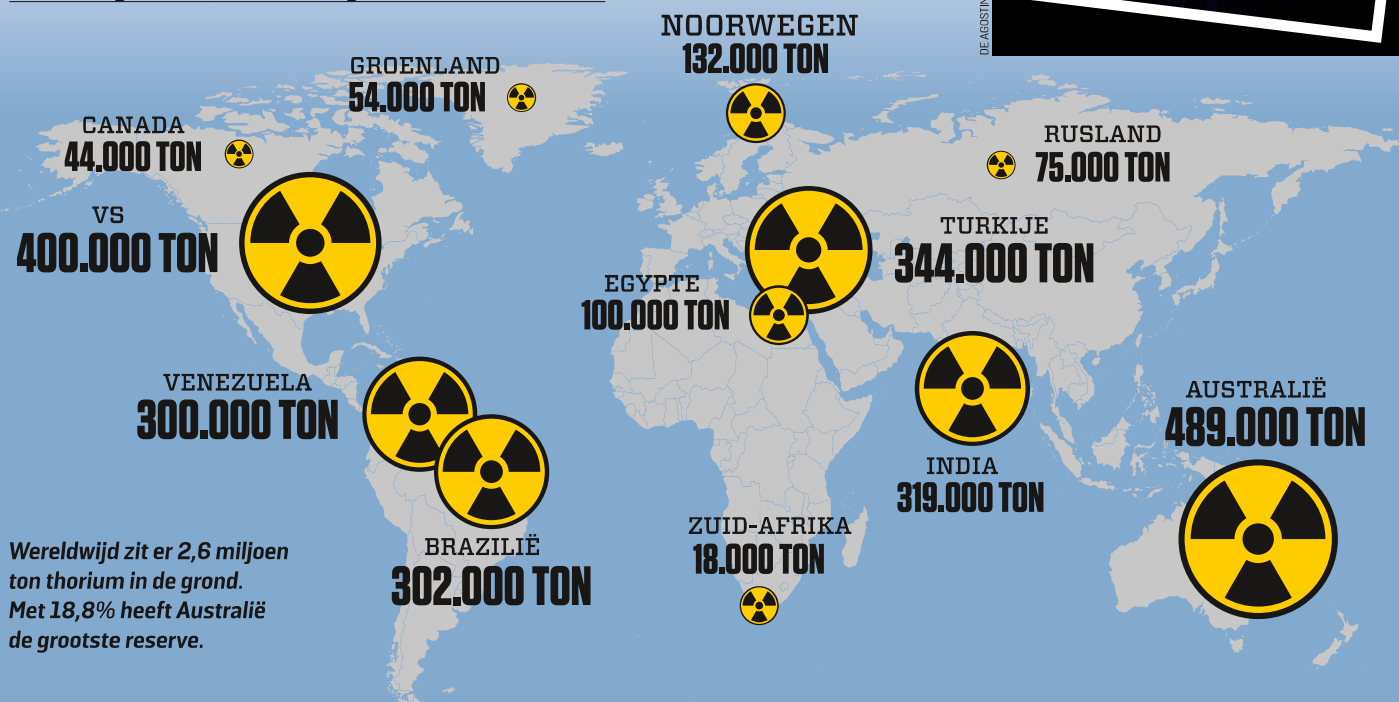
THORIUM BELANDT IN KERAMISCHE PILLEN

- Thorium wordt gewonnen uit monaziet.
- In zijn pure vorm is thorium een zilverglanzend metaal.
- Keramische pillen van thoriumdioxide worden getest in een nieuwe Indiase reactor en in Noorse proefinstallaties.



Noorwegen heeft de grootste thoriumreserve van Europa

Slechts 5000 ton thorium kan voorzien in het stroomverbruik van een jaar. Tot dusver is er 2,6 miljoen ton thorium in de bodem gevonden, en er valt nog veel meer te ontdekken.



Wereldwijd zit er 2,6 miljoen ton thorium in de grond. Met 18,8% heeft Australië de grootste reserve.

DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY; GETTY IMAGES



Brandstofstaven worden in water geplaatst voor het splijtingsproces.

TORBJORN TANDBERG / SCATEC



HEDEN

CLAUS LUNAU

Thorium vermengd met kernbrandstof

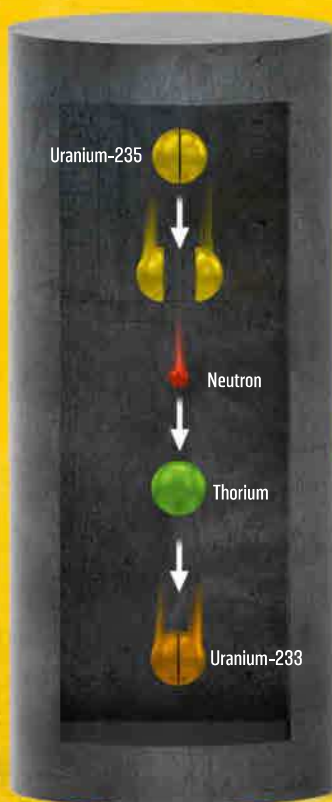


Het Noorse bedrijf Thor Energy maakt brandstofstaven die thorium met uranium bevatten. De brandstofstaven worden getest in een proefreactor en zullen gebruikt worden in bestaande kerncentrales.



1 THORIUM EN U235 VERMENGD

Keramisch thoriumoxide wordt gemengd met bijvoorbeeld splijtbaar uranium-235, dat uit gebruikte kernbrandstof gewonnen kan worden. De uraniumatoomkernen zijn instabiel, waardoor ze spontaan splijten.



2 URANIUM BRENGT PROCESSEN OP GANG

Bij kernsplijtingen zendt U235 neutronen uit. Als die op thorium stuiten, zetten ze het om in een andere uraniumisotoop: U233. De hitte die ontstaat, brengt water aan de kook en drijft een turbine aan.



3 REACTIE GAAT VANZELF VERDER

Er wordt zoveel thorium omgezet in U233 dat de kettingreacties vanzelf doorlopen: U233 zendt nieuwe neutronen uit, die meer thorium omzetten in U233, dat gespleten wordt enzovoort.

» passen in huidige kerncentrales zonder dat die omgebouwd hoeven te worden.

Daartoe wordt thorium vermengd met uranium of plutonium; deze stoffen leveren de neutronen die de omzetting van thorium in uranium op gang brengen. Een neutron dat thorium treft, wordt geabsorbeerd, en daarbij ontstaat thorium-233. Dit vervalt snel tot proactinium-233 en dat weer tot uranium-233 of U233. De atoomkern splijt en houdt de kettingreacties op gang.

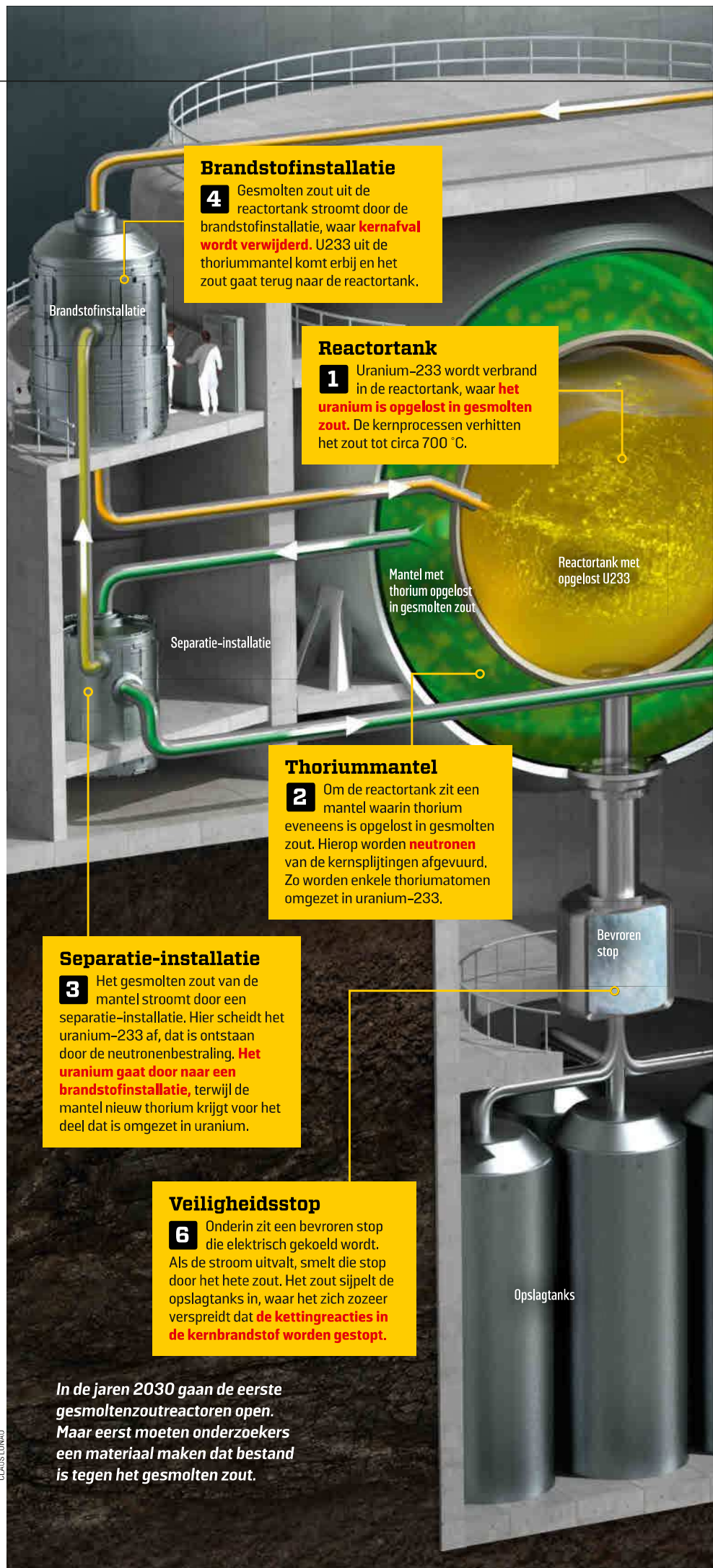
India, met de op drie na grootste reserve van thorium ter wereld, verwacht veel van de nieuwe kernbrandstof. Sinds 1996 draait er een proefreactor op uranium-233, dat is gemaakt door thorium in een andere reactor te bestoken met neutronen. Dit jaar start er een prototypereactor met 10 MW vermogen. Ter vergelijking: in Fukushima hadden de reactoren een vermogen van 1100 MW. De thoriumreactor produceert vooral stroom uit plutonium, maar om de reactorkern zit een mantel van thorium, dat wordt omgezet in uranium-233; dit neemt ook een deel van de energieproductie voor zijn rekening.

In de jaren 2020 denkt India klaar te zijn met een 300 MW-reactor, die een mengsel van thorium, uranium en plutonium stookt, en hier leveren keramische thoriumdioxide-pillen 60 procent van de energie. Het is de bedoeling dat een derde van de Indiase stroom in 2050 afkomstig is van thorium.

Terwijl India thoriumcentrales met vaste brandstof ontwikkelt, gaat China aan kop op het gebied van de nog meer geavanceerde gesmoltenzoutreactoren, die kernbrandstof in gesmolten zout verwerken. In 2022 moet een Chinese proefreactor met een vermogen van 10 MW klaar zijn. Bij de start verstookt de reactor splijtbaar uranium, maar om de reactortank zit een mantel van thorium, dat bestraald wordt met neutronen en omgezet wordt in splijtbaar uranium-233. Het aldus ontstane uranium gaat de reactortank in en vult de brandstof voortdurend aan. Daarom kan de reactor na het opstarten toe met natuurlijk thorium, dat begint in de mantel en eindigt in de reactortank. In 2030 willen de Chinezen een demonstratiereactor van 100 MW bouwen, die de weg zal vrijmaken voor commerciële gesmoltenzoutcentrales die draaien op thorium.

Kernrampen zijn verleden tijd

In een gesmoltenzoutcentrale op basis van thorium bestaat de brandstof in de tank uit uranium-233, opgelost in gesmolten zout van lithiumfluoride en berylliumfluoride. Dit mengsel is chemisch extreem stabiel en houdt niets over aan neutronenbestraling. Verder kan het zout niet in brand vliegen of ontploffen, en het kookt pas bij 1400 °C, wat veel heter is dan de werktemperatuur »



Brandstofinstallatie

4 Gesmolten zout uit de reactortank stroomt door de brandstofinstallatie, waar **kernafval wordt verwijderd**. U233 uit de thoriummantel komt erbij en het zout gaat terug naar de reactortank.

Reactortank

1 Uranium-233 wordt verbrand in de reactortank, waar **het uranium is opgelost in gesmolten zout**. De kernprocessen verhitten het zout tot circa 700 °C.

Thoriummantel

2 Om de reactortank zit een mantel waarin thorium eveneens is opgelost in gesmolten zout. Hierop worden **neutronen** van de kernsplijtingen afgevuurd. Zo worden enkele thoriumatomen omgezet in uranium-233.

Separatie-installatie

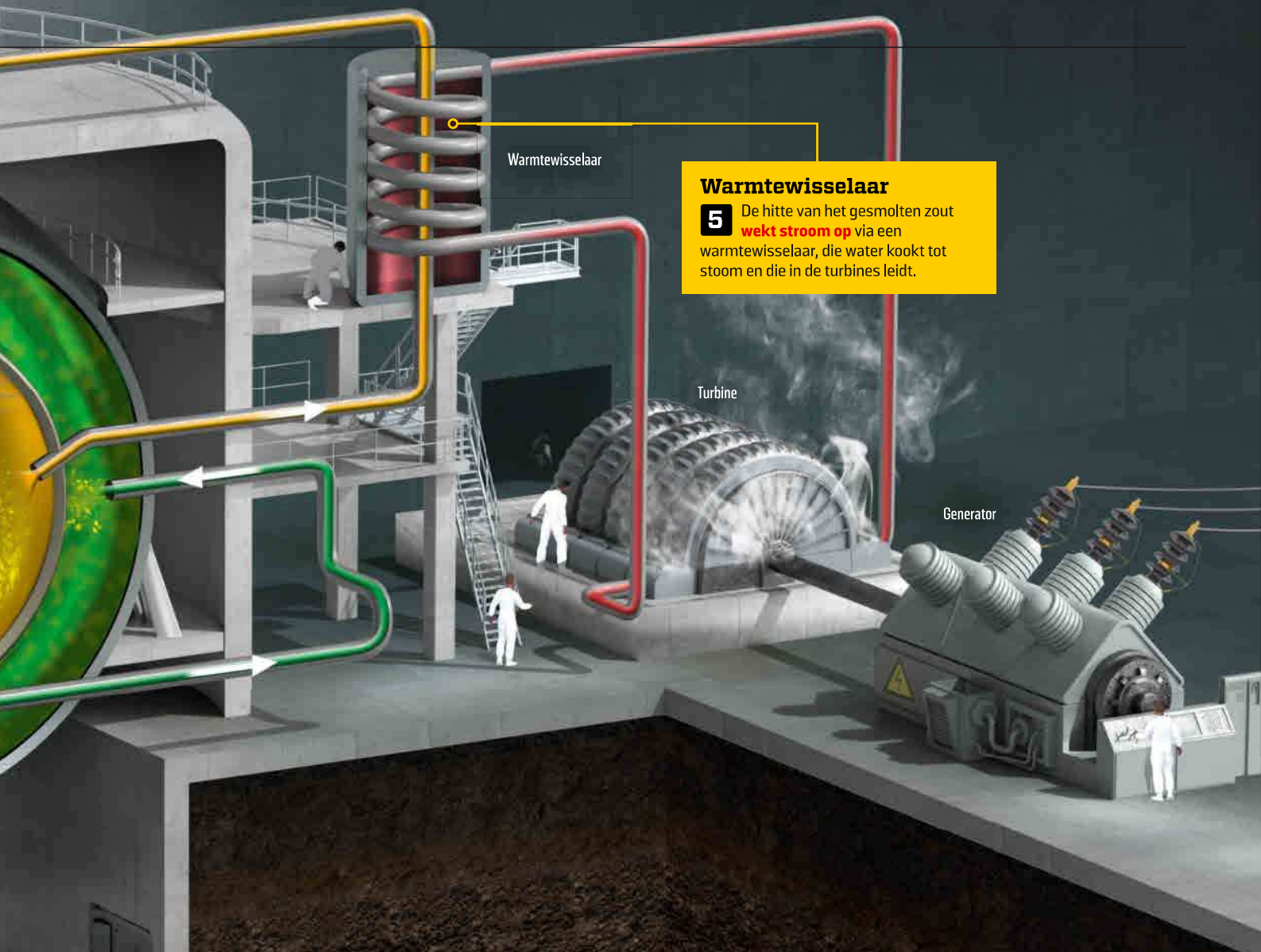
3 Het gesmolten zout van de mantel stroomt door een separatie-installatie. Hier scheidt het uranium-233 af, dat is ontstaan door de neutronenbestraling. **Het uranium gaat door naar een brandstofinstallatie**, terwijl de mantel nieuw thorium krijgt voor het deel dat is omgezet in uranium.

Veiligheidsstop

6 Onderin zit een bevroren stop die elektrisch gekoeld wordt. Als de stroom uitvalt, smelt die stop door het hete zout. Het zout sijpelt de opslagtanks in, waar het zich zo zeer verspreidt dat **de kettingreacties in de kernbrandstof worden gestopt**.

In de jaren 2030 gaan de eerste gesmoltenzoutreactoren open. Maar eerst moeten onderzoekers een materiaal maken dat bestand is tegen het gesmolten zout.

CLAIS LUNAU



Warmtewisselaar

Warmtewisselaar

5 De hitte van het gesmolten zout **wekt stroom op** via een warmtewisselaar, die water kookt tot stoom en die in de turbines leidt.

Turbine

Generator



OVER 15 JAAR

Gesmoltenzoutreactor reguleert zichzelf

Als de kernsplijting op gang is, kan een gesmoltenzoutreactor op puur thorium werken, dat de centrale zelf omzet in splijtbaar uranium. De reactor is veilig, ook als de stroom uitvalt.

Een gesmoltenzoutcentrale werkt doordat thorium constant wordt omgezet in splijtbaar uranium-233. Bovendien is de reactor een zelfsturende thermostaat, en is een kernramp zoals in Tsjernobyl uitgesloten. De reactor is maar voor driekwart gevuld met

gesmolten zout. Als de kettingreacties te heftig worden, wordt het zout heter en zet het uit. De afstand tussen de uraniumatomen wordt nu groter, waardoor het splijtingsproces vertraagt. Daardoor daalt de temperatuur, slinkt het zout en werkt alles weer normaal.

» van de reactor van 700 °C. Als het zout te heet wordt, zet het uit, waardoor de afstand tussen de uraniumatomen toeneemt. Dat brengt het aantal kernsplijtingen en dus ook de hitteproductie omlaag, waardoor het zout weer slinkt. Op die manier werkt de reactor als een thermostaat die zelf de warmte kan reguleren. En daardoor kan de reactor niet overkoken, zoals bijvoorbeeld in Tsjernobyl gebeurde. Ook een meltdown is uitgesloten, want de brandstof is al gesmolten tijdens het gewone gebruik in de centrale.

De elektriciteit wordt opgewekt zoals in een gewone centrale. Als het zoutmengsel met vloeibaar U233 door de kernsplijtingen is verhit, doorloopt het een circuit waarbij de warmte wordt benut om een turbine aan te drijven die de elektriciteit produceert.

Reactor wordt afvalverwerker

Kernafval van een gesmoltenzoutcentrale op thoriumbasis bevat geen langdurig radio-

actieve stoffen. Het afval hoeft maar 300 jaar te worden opgeslagen voor de radioactiviteit afzwakt. Het brandstofafval is aanvankelijk wel hoogradioactief en moet dan met robots op afstandsbediening worden verwerkt.

Een ander afvaltechnisch voordeel van gesmoltenzoutreactoren is dat ze de resten splijtbare stoffen in gebruikte brandstof van gewone kerncentrales kunnen verstoken. De huidige kerncentrales benutten hooguit 6,5 procent van het uranium-235 dat in de brandstofstaven zit, en daarna bevatten de staven niet genoeg splijtbaar uranium meer om de kettingreacties stabiel te houden.

Door het kernafval te verbranden in een gesmoltenzoutreactor kan al het splijtbaar materiaal worden gebruikt. Een gesmoltenzoutreactor die kernafval verbrandt is een simpelere constructie dan een vergelijkbare centrale die energie uit thorium haalt. De reactortank heeft namelijk geen mantel van thorium nodig die bestraald moet worden;

het kernafval wordt gewoon opgelost in heet zout en zo in de reactortank gegoten.

Keramik gaat roest tegen

Al zijn gesmoltenzoutreactoren nog niet in gebruik, het idee is al oud. In de jaren 1960 draaide er in de VS een proefreactor in de kerninstallatie Oak Ridge. De reactor werkte prima, maar bracht de achilleshiel van de technologie aan het licht: door gesmolten zout gaan de metalen in de tank roesten. Er moeten dus stevige materialen komen die tientallen jaren bestand zijn tegen gloeiend heet zout en neutronenbestraling.

In Oak Ridge waren de reactortank en de buizen gemaakt van een nikkellegering, die de belasting vier jaar aankon, maar 30 tot 40 jaar werken in een kerncentrale is te veel voor het metaal. Nu is de hoop gevestigd op roestvrij keramiek van siliciumcarbide, dat de sleutel kan zijn tot de simpele, veilige en efficiënte kernenergie van de toekomst. □

Thorium geeft veel minder kernafval dan uranium

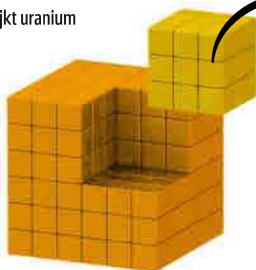
Een gesmoltenzoutreactor met een vermogen van 1000 MW verbruikt slechts een ton natuurlijk thorium per jaar, terwijl een gewone kerncentrale 35 ton verrijkt uranium verstoekt. Het afval is bovendien minder riskant.

URANIUM

THORIUM

WINNING

35 ton verrijkt uranium



250 ton gewonnen uranium

Een gewone kernreactor verstoekt 250 ton natuurlijk uranium per jaar. Vóór de verbranding wordt dit omgezet in **35 ton verrijkt uranium**, waarvan 3-5% bruikbaar U235 is, en de rest U238.

1 ton gewonnen thorium



Een gesmoltenzoutreactor verbruikt jaarlijks **1 ton thorium**, dat niet door een omslachtig verrijkingsproces heen hoeft.

VERBRANDING

Lichtwaterreactor



U235 kan maar gedeeltelijk verstoekt worden, terwijl een deel van het U238 wordt omgezet in **splijtbaar plutonium-239**, dat eveneens slechts gedeeltelijk kan worden verbrand.

Gesmoltenzoutreactor



Thorium wordt omgezet in splijtbaar uranium-233 en volledig verbrand. **Het afval bestaat uit** 1 ton splijtingsproducten: radioactieve atomen die te klein zijn om gespleten te kunnen worden.

AFVAL

35 ton kernafval

33,4 ton uranium-238



0,3 ton uranium-235

0,3 ton plutonium

1 ton restproducten



De centrale produceert 35 ton brandstofafval. De gebruikte brandstofstaven moeten **100.000 jaar** veilig worden opgeslagen.

1 ton restproducten



83% van het hoogradioactieve afval is al na tien jaar tot niet-radioactieve stoffen vervallen, maar 17% moet **300 jaar** worden opgeslagen. Het overige afval, 100 gram plutonium, is weer bruikbaar als kernbrandstof.



TOEKOMST

Overtollige energie wordt uit kernafval geperst

350.000 ton hoogradioactief brandstofafval ligt over de hele wereld in tijdelijke opslagplaatsen. Een deel kan verwerkt worden door gesmoltenzoutreactoren.

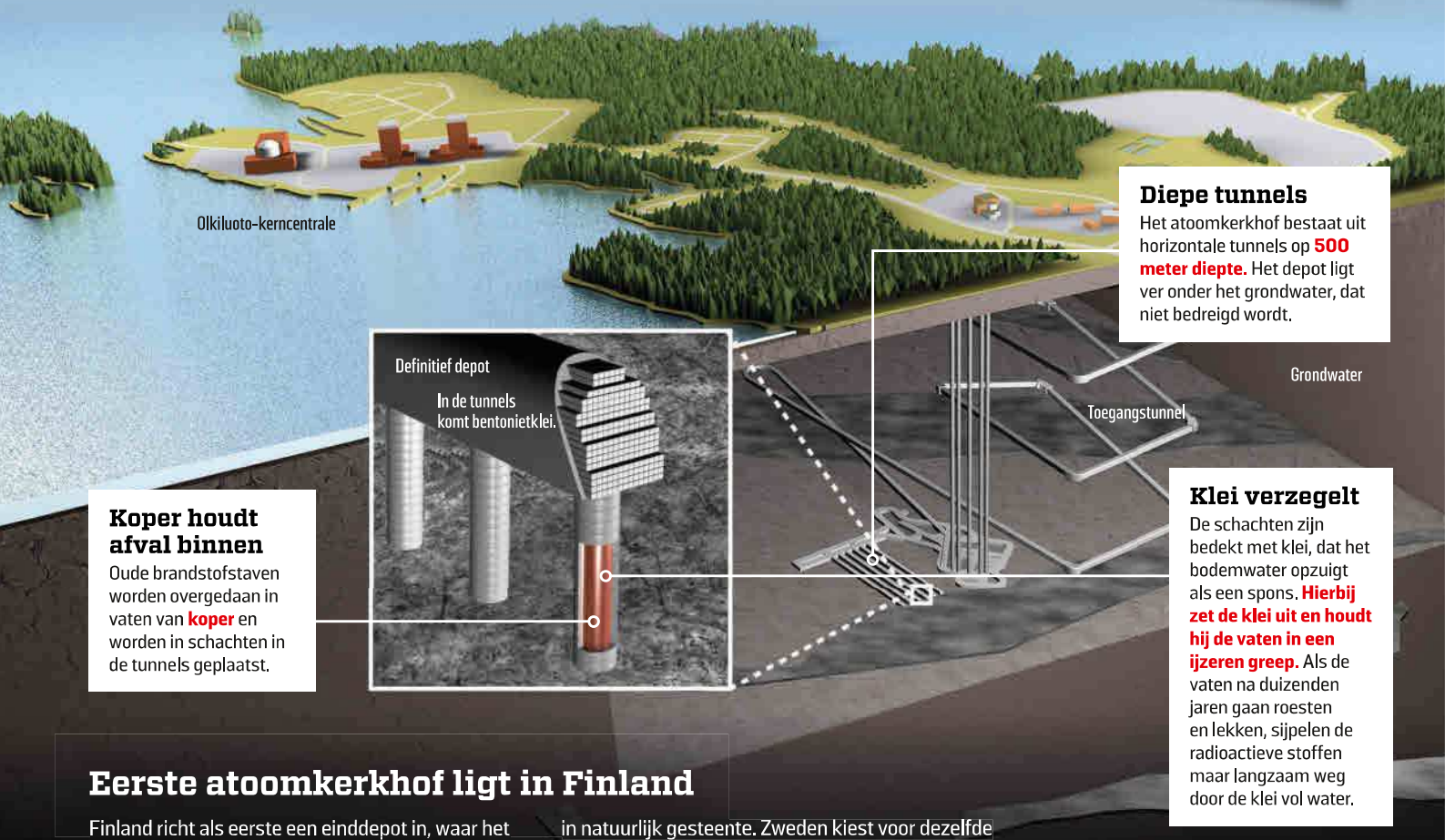
Kerncentrales verbranden hooguit 6,5% van het splijtbaar uranium-235 in de brandstofstaven. Verder gebruik van de brandstof loont niet. Gesmoltenzoutreactoren kunnen echter al het splijtbaar materiaal in gebruikte brandstof verstoffen, en naderhand hoeven de radioactieve reststoffen maar een paar eeuwen te worden opgeslagen.

Maar gesmoltenzoutreactoren lossen niet alle afvalproblemen op. Flibe Energy in de VS berekende dat we 93 jaar lang dagelijks een 100 MW-centrale moeten openen om van de bergen hoogradioactief afval af te komen. Er moeten dan ook onmiddellijk definitieve opslagplaatsen komen om de tijdelijke depots te vervangen.



Depots met kernafval zijn kwetsbaar voor o.a. natuurrampen en terreur.

THOMAS IMO/BETTY IMAGES



Olkiluoto-kerncentrale

Diepe tunnels

Het atoomkerkhof bestaat uit horizontale tunnels op **500 meter diepte**. Het depot ligt ver onder het grondwater, dat niet bedreigd wordt.

Grondwater

Toegangstunnel

Definitief depot

In de tunnels komt bentonietklei.

Koper houdt afval binnen

Oude brandstofstaven worden overgedaan in vaten van **koper** en worden in schachten in de tunnels geplaatst.

Klei verzegelt

De schachten zijn bedekt met klei, dat het bodemwater opzuigt als een spons. **Hierbij zet de klei uit en houdt hij de vaten in een ijzeren greep**. Als de vaten na duizenden jaren gaan roesten en lekken, sijpelen de radioactieve stoffen maar langzaam weg door de klei vol water.

Eerste atoomkerkhof ligt in Finland

Finland richt als eerste een einddepot in, waar het hoogradioactieve afval van het land 500 meter onder de grond begraven zal worden in geologisch stabiel graniet. Hier zullen de gebruikte brandstofstaven 100.000 jaar liggen, terwijl de radioactiviteit daalt naar het niveau van de straling

in natuurlijk gesteente. Zweden kiest voor dezelfde oplossing. De einddepots in beide landen worden in de jaren 2020 in gebruik genomen. In de VS zal hoogradioactief afval vanaf 2048 worden begraven in Yucca Mountain in Nevada. Andere landen weten nog niet wat ze met hun kernafval gaan doen.

Het atoomkerkhof ligt in een geologisch stabiel gebied en kan 100.000 jaar mee.

POSIVA OY