

# **KERNVISIE** MAGAZINE

▶ **SHINE: PRODUCTIE  
MOLYBDEEN MET  
VERSNELLER**

▶ **OOK IN 2020  
WERELDWIJDE ACTIE  
VOOR KERNENERGIE**

▶ **KERNVISIE  
SPECIAL:  
GEN-IV  
KERNREACTOREN**

**LEERSTOEL LEIDT  
TOT NAUWKEURIGER  
BESTRALING**

# COLOFON

KernVisie magazine is een uitgave van:



Stichting **KernVisie**  
EEN ENERGIEK INITIATIEF

**JAARGANG 14, NUMMER 5/6, DECEMBER 2019**  
**KERNVISIE VERSCHIJNT TWEEMAANDELIJKS**  
**OPLAGE 2200 EX**

## **ONTWERP & GRAFISCHE REALISATIE**

StudioHusken.nl, Den Helder

## **BESTUUR STICHTING KERNVISIE**

Ir. A.M. Versteegh, voorzitter  
Ir. G.H. Boersma, secretaris  
Ir. E.W. Schuuring, penningmeester  
J.D. Bruin  
Ing. W. Hiddink  
Drs. J.J. de Jong  
Ir. J.C.L. van Cappelle  
Prof. Ir. R.W.J. Kouffeld  
Ir. G.C. van Uitert

*Met dank aan Ferry Roelofs en Geert-Jan de Haas  
voor hun bijdragen*

## **REDACTIE KERNVISIE**

Ir. G.H. Boersma  
M. Jelgersma (Sherpa en de Fries)  
E.S. Jelgersma (Sherpa en de Fries)  
I. van Kessel (Irene van Kessel Fotografie)

## **REDACTIE ADRES**

Dokter Bosmanshof 32, 6851 MJ Huissen  
Telefoon 026-2130214  
E-mail: kernvisie@kernvisie.com  
Internet: www.kernvisie.com  
Bankrekening NL19 INGB 0006 8513 70, t.n.v.  
Kernvisie, Foundation for Nuclear Energy te Zwijndrecht.

## **OP DE COVER**

Prof. dr. Mischa Hoogeman  
Foto © Irene van Kessel

*Distributie, onder vermelding Stichting Kernvisie, via eigen  
e-mail systemen en gebruik van de informatie voor lezingen,  
presentaties, studies, discussies, publicaties, enz. wordt op prijs  
gesteld en toegejuicht.*

## **OMGANG MET PEROONSgegevens**

*KernVisie Magazine is een uitgave van de Stichting KernVisie.  
Onze website [www.kernvisie.com](http://www.kernvisie.com) bevat een uitgebreide  
privacyverklaring over het gebruik van de persoonsgegevens die  
nodig zijn ten behoeve van de verzending van het Magazine.*



## **VOORWOORD**

# **INVESTEREN IN DE VOLGENDE GENERATIE**

Vlak voor de afsluiting van 2019 is het goed om eens naar voren te kijken, en dan eens niet naar het komende jaar maar naar de echte toekomst. Vanaf 2040 moeten de eerste innovatieve reactoren van de vierde generatie, de zogenaamde Gen-IV-reactoren, een belangrijke bijdrage gaan leveren aan een CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening. Het Generation IV International Forum (GIF) is een initiatief van het Amerikaanse ministerie van Energie uit 2000. Het is een internationaal collectief waaraan 13 landen deelnemen. Binnen het samenwerkingsverband zijn 130 reactorconcepten beoordeeld waarvan zes technologieën voor verder onderzoek en ontwikkeling in aanmerking kwamen. Zowel bij NRG als bij het RID van de TU Delft wordt onderzoek gedaan naar de innovatieve Gen-IV-technologie. NRG is wereldspeler op gebied van thermo-hydraulische analyses voor zowel hedendaagse watergekoelde reactoren als voor Gen-IV gas, gesmoltenzout en metaalgekoelde reactoren. In de Special in dit nummer geven programmamanager bij NRG Geert-Jan de Haas en Ferry Roelofs, NRG programmacoördinator modellering en simulatie, antwoord op nut en noodzaak van het Gen-IV-onderzoek dat geheel aansluit bij de Roadmap van Nuclear Nederland. Deze Roadmap uit 2016 schetst de benodigde kennisinfrastructuur om de inzet van kernenergie te kunnen blijven faciliteren. En om toch maar bij het komende jaar te eindigen: namens de Stichting Kernvisie wens ik u allen een gezond 2020! **K**

*André Versteegh*  
voorzitter Stichting Kernvisie

Disclaimer: De redactie van Kernvisie Magazine heeft haar uiterste best gedaan om de rechthebbenden van alle foto's in deze uitgave te achterhalen. In enkele gevallen is dat niet gelukt. Mocht u in geval van een omissie of een vergissing menen de rechthebbende van een foto of illustratie te zijn, gelieve contact op te nemen met de Stichting Kernvisie: [info@kernvisie.com](mailto:info@kernvisie.com)

# **K** INHOUD

## MEDISCH

### LEERSTOEL MOET TOT NOG NAUWKEURIGER BESTRALING LEIDEN

Prof. dr. Mischa Hoogeman is benoemd op de bijzondere leerstoel Hoge Precisie Adaptieve Radiotherapie aan de TU Delft. De leerstoel is gekoppeld aan onderzoek dat is gericht om de bijwerkingen en de schade aan omliggend gezond weefsel door bestraling nog verder te beperken.



**P04**

### P07 MAATSCHAPPIJ

KIVI KE- NNS-symposium The Fukushima accident and its learnings

### P12 INBEELD

Bestraalde vaccins houden veestapel gezond

### P17 COLUMN

André Wakker: 'The times they are a-changin', dames en heren

### P25 BOEKBESPREKING

Kernenergie als kans – Rauli Partanen en Janne Korhonen  
Zonder kernenergie gaat het CO<sub>2</sub>-niveau niet (genoeg) omlaag

## ENERGIE

### OOK IN 2020 WERELDWIJDE ACTIE VOOR KERNENERGIE

Ook in 2020 wordt wereldwijd actiegevoerd voor kernenergie als klimaatvriendelijke energiebron, na de succesvolle actiedag Stand up for Nuclear afgelopen najaar. Vele honderden mensen in 33 steden over de hele wereld, gingen toen, op 20 oktober 2019, de straat op om voor kernenergie als schone energiebron te pleiten en ze bereikten vele duizenden mensen op de manifestaties.

**P15**

## MEDISCH

### SHINE: PRODUCTIE MOLYBDEEN MET VERSNELLER AANGEDREVEN URANIUMSPLIJTING

De eerste paal is in de grond gegaan voor de bouw van SHINE's eerste Medical Isotope Production Facility in Janesville, Wisconsin (VS) die naar verluidt in 2021 gereed zal zijn en in 2022 commercieel inbedrijf wordt genomen.



**P22**



© SCK-CEN

## **K** P26 SPECIAL

### GEN-IV KERNREACTOREN: ESSENTIEEL VOOR TOEKOMSTIGE ENERGIEVOORZIENING

**P28** Het Europese programma

**P30** Geavanceerde reactorontwerpen; een overzicht

**P35** Modelleren en simulatie belangrijk bij ontwerpondersteuning en veiligheidsanalyse

**P41** Geavanceerde reactortechnologieën in meerjarenonderzoek NRG

**P43** Zeven te gekke sci-fi kernreactoren



MEDISCH

➤ Prof. dr. Mischa Hoogeman



# LEERSTOEL MOET TOT NOG NAUWKEURIGER BESTRALING LEIDEN

In mei van dit jaar werd prof. dr. Mischa Hoogeman benoemd op de bijzondere leerstoel Hoge Precisie Adaptieve Radiotherapie aan de TU Delft. Daarnaast is Hoogeman sinds 1 november 2017 hoogleraar aan de Erasmus Universiteit en werkzaam als hoofd klinische fysica en informatica bij HollandPTC en het Erasmus MC: "Bij radiotherapie draait het erom de tumor te bestralen en wel zodanig dat de omliggende organen niet of in ieder geval zo min mogelijk worden belast."

Sinds 2018 is protontherapie in Nederland beschikbaar. Protonen zijn positief geladen deeltjes die vooraf een bepaalde indringdiepte meekrijgen. Op het moment dat ze stilvallen geven ze hun maximale dosis af. Dit wordt de Bragg-piek genoemd. Fotonen daarentegen zijn elektromagnetische energiegolven die hun maximale dosis vlak onder de huid afgeven waarna de stralingsdosis geleidelijk afneemt. Hierdoor komt bij bestraling met een bundel fotonen relatief veel stralingsdosis terecht in het gezonde weefsel voor de tumor en wordt ook het weefsel achter de tumor bestraald. Het lijkt daarmee dat een bestraling met protonen de voorkeur geniet maar volgens Hoogeman heeft het voornoemde voordeel van de protontherapie ook een nadeel. "Als de anatomie om de tumor iets verandert dan kunnen de protonen op een andere plek stoppen. In dat geval krijgt de tumor niet de dosis maar komt die in het omliggend weefsel terecht. Ook weten we niet altijd waar de protonen stoppen. Dat is de Achilleshiel van protonen, want ze stoppen wel, maar waar stoppen ze precies? We kunnen dat tot op een niveau van 1 tot 3 millimeter bepalen." Met alle bewegelijkheden van tumoren in combinatie met de onzekerheid van de berekening van de dracht van de bundel, wordt gebruik gemaakt van een veiligheidsmarge. "Dat betekent extra dosis in het omliggend weefsel en meer kans op een beschadiging van dat omliggend weefsel. De kunst, en dat is een belangrijk onderdeel van ons onderzoeksprogramma, is om die veiligheidsmarge zo klein mogelijk te maken, bijvoorbeeld door vlak voor de behandeling het behandelplan aan te passen." De gevoeligheid van protontherapie is dus groter. Voordat een nieuwe bestralingssessie plaatsvindt moet niet alleen eerst weer de juiste positie van de tumor worden vastgesteld, maar moet ook rekening worden gehouden met wat er in het omliggend weefsel gebeurt. Hoogeman benadrukt dat het niet weten waar de tumor precies zit, weliswaar een probleem kan zijn, maar dat dit niet protonenspecifiek is.

## BEHANDELPLAN

Voor een bestraling plaatsvindt, wordt altijd een behandelplan gemaakt. "Dat is een lijst met instellingen van de machine die ervoor zorgt dat de gewenste dosisverdeling in de patiënt terecht komt. Die dosis omsluit de tumor heel nauw en spaart de omliggende organen zo veel mogelijk." Het behandelplan wordt gemaakt op basis van beeldvorming, veelal een CT-scan voorafgaand aan de bestralingssessie. "We geven niet in één keer de complete bestraling maar we spreiden die uit over soms wel dertig fracties (bestralingssessies); over een periode van dertig dagen. Daarmee sparen we het gezonde weefsel dat in de tussengelegen periodes de kans krijgt om zich te herstellen van eventueel opgelopen schade." Dit geldt volgens Hoogeman niet voor het tumorweefsel dat zich moeilijker weet te herstellen waardoor de schade in de loop van de behandeling juist oploopt. Soms is het nodig het behandelplan aan te passen. De aanpassing van de behandeling is nodig omdat de patiënt in de loop van de behandeling kan veranderen. "De anatomie van een patiënt kan elke dag net iets anders zijn. Dat hangt ook af van de locatie die wordt bestraald, zoals een tumor in de long die kan bewegen door de ademhaling, een tumor in het bekkengebied waar de blaas voller of leger kan zijn en de tumor in meer of mindere mate wegdukt. En op een langere tijdschaal bij patiënten met hoofd-halskanker als de tumor kleiner wordt of de patiënt afvalt als bijwerking van de behandeling."

## HOLLANDPTC

De protonencentra zullen uiteindelijk iets meer dan vier procent van het totaal aantal patiënten in Nederland dat voor bestraling in aanmerking komt behandelen. HollandPTC is nu ongeveer een jaar in bedrijf. De leerstoel van Hoogeman is gekoppeld aan onderzoek dat is gericht om de bijwerkingen en de schade aan omliggend gezond weefsel door bestraling van een patiënt nog verder te beperken. Hoogeman: "Bij radiotherapie draait het erom de tumor, of in ieder geval het

gebied dat door de radiotherapeut-oncoloog is aangegeven, te bestralen en wel zodanig dat het omliggende gezonde weefsel en organen niet of in ieder geval zo min mogelijk worden belast." Het gaat daarbij om directe bijwerkingen die tijdens de behandeling optreden en bijwerkingen die soms pas na een jaar of twee jaar of nog veel later merkbaar zijn en vaak ook blijvend zijn. Als voorbeeld geeft Hoogeman de bijwerkingen die na behandeling van hoofd-halstumoren kunnen optreden zoals een droge mond of slikklachten. "Als je de klachten kan reduceren biedt dat voordelen. De behandeling is geslaagd en er treden minder of geen bijwerkingen op. Maar het kan ook zo zijn dat het reduceren van de bijwerkingen ruimte biedt om de behandeling te intensiveren bij tumoren die erg resistent zijn."

## UNIEKE OPSTELLING

Het vaststellen van de locatie van de tumor gebeurt op dit moment met een zogenaamde Cone Beam CT-scanner. Hiermee kunnen we de patiënt nauwkeurig uitlijnen ten opzichte van de protonenbundel. Echter de beeldkwaliteit is onvoldoende om op basis van de Cone Beam CT scan een nieuw behandelplan te maken. Daarom zijn we met een nieuwe ontwikkeling bezig waarbij de patiënt die op een robotische behandelafel ligt naar een diagnostische CT-scanner op rails gemanoeuvreed kan worden. "Dit is een unieke opstelling bij HollandPTC waarbij het doel is om tussen CT-scan en behandeling slechts dertig seconden te laten zitten." Hoogeman legt uit dat deze opstelling een uitwerking is van het project ADAPTNOW, een samenwerking van het RID, Erasmus MC, LUMC en HollandPTC, en wordt opgevolgd door het project Imagination van het Erasmus MC, HollandPTC en het RID. Imagination is de ontwikkeling van een wereldwijd eerste volledig geautomatiseerde online adaptieve protontherapie met als eerste klinische implementatie voor patiënten met hoofd- en halskanker. Het doel van dit project is dat protonenbehandelingen aangepast kunnen worden aan de exacte anatomie van de dag 

van de patiënt met een minimale interactie van de artsen en de behandelingsplanners. Dat is gewenst omdat op dit moment een groter gebied dan de tumor zelf wordt bestraald om voor die anatomische veranderingen te kunnen compenseren. Hoogeman: "We werken uiteraard met een veiligheidsmarge zodanig dat de tumor de juiste dosis krijgt."

### CONTROLLEREN IN SITU

Een nieuwe ontwikkeling bij fotontherapie is om met MRI-gestuurde apparaten tijdens de bestraling te kijken wat er gebeurt. Volgens Hoogeman is het niet strikt noodzakelijk om dat bij protontherapie ook te hebben. "Bij veel indicaties wijzigt de anatomie tussen het maken van de scan vlak voor de bestraling en de bestraling zelf niet veel. Als de bestralingstijd kort is kun je er veilig van uitgaan dat de tumor zo ligt als vooraf is vastgesteld." Om daar zeker van te zijn, kan dat achteraf gecontroleerd worden door een scan te maken. Op dit moment vindt wel onderzoek plaats om in de toekomst de dosis in situ te controleren. Die techniek is gebaseerd op een kernreactie van protonen met de atoomkernen waarbij prompte gammastraling en positron-annihilatiestraling ontstaat. Die twee soorten straling verlaten het lichaam. Door die straling te meten, kan in principe bepaald worden hoe diep de protonen binnendringen. "Die ontwikkeling heeft zeker toegevoegde waarde, maar ik zie dit meer als een kwaliteitscontrole dat we de dosis op de goede plek afgeven. Want als je het behandelplan aan hebt gepast moet je ook zeker weten dat dan de Bragg-piek daadwerkelijk daar komt waar je hem wil hebben."

### KEUZE FOTONEN OF PROTONEN

Niet iedereen komt voor protontherapie in aanmerking. Van alle radiotherapeutische behandelingen komt 4,4 procent van de patiënten bij een van de protonenbehandelcentra terecht. Bij sommige soorten kanker, de zogenaamde 'model-based' indicaties, wordt een



© Varian

➤ Vanaf links midden op de foto is de buis te zien waar de protonenbundel doorheen gaat. De bundel komt vanaf het cyclotron en wordt door zeer sterke magneten naar de verschillende behandelruimtes geleid.

mogelijk voordeel van protontherapie per patiënt bekeken door een fotonen- en een protonenbestralingsplan met elkaar te vergelijken. Hieruit volgt welke organen welke dosis krijgen. Als blijkt dat protontherapie een klinisch significante reductie voorspelt in de bijwerkingen ten opzichte van fotontherapie dan wordt voor de eerste vorm gekozen. "Na behandeling bekijken we altijd of de resultaten overeenkomen met dat wat we op basis van de behandelplannen verwachtten." Bij sommige soorten kanker, de zogenaamde standaardindicaties, biedt protontherapie sowieso een voordeel ten opzichte van fotonradiotherapie. Een voorbeeld is de behandeling van bepaalde oogtumoren. Een 'ooglijn' wordt op dit moment getest bij HollandPTC en wordt binnenkort in gebruik genomen.

### SAMENWERKING MET HET RID

Bij het RID is een techniek ontwikkeld, Polynomial Chaos Expansion (PCE) waarmee het mogelijk is om een verstoring tijdens een behandeling van tevoren te simuleren. Dat kan de dracht zijn die niet goed is ingeschat of een patiënt die iets is verschoven. De techniek vindt zijn oorsprong in het reactoronderzoek. "Met PCE kunnen we nu heel snel een inschatting maken van de onzekerheid die we hebben bij een

dosisverdeling. Met de nieuwe rekenmethode kunnen we heel gericht de beste manier vaststellen om een behandelplan te maken dat robuust is voor die onzekerheden zonder 'te' robuust te zijn." Die robuustheid is eigenlijk de veiligheidsmarge die we inbouwen in het behandelplan. Te weinig robuust betekent in dezen dat de tumor te weinig dosis krijgt en te robuust dat je een te groot gebied bestraalt en het gezonde weefsel beschadigt. "Met PCE zie je een goede samenwerking tussen het RID en HollandPTC waarbij een techniek die daar ontwikkeld is kan worden toegepast in de zorg. Het is een project dat door het KWF is gehonoreerd. Wij proberen nu richtlijnen te ontwikkelen om te zien hoe we met die onzekerheden om moeten gaan om precies genoeg robuust te zijn." Het project loopt al een jaar en duurt nog drie jaar. "Binnen ProTrait werken wij aan een landelijk registratie systeem van bijwerkingen bij de patiënten en effecten op tumoren na protontherapie en registreren ook of de beoogde afname van bijwerkingen overeenkomt met onze aannames. Wat wij doen is het koppelen van ProTrait aan PCE om te kijken hoe goed – hoe robuust – de behandelplannen zijn." **K**

Menno Jelgersma



# SYMPOSIUM THE FUKUSHIMA ACCIDENT AND ITS LEARNINGS



**Dit symposium, georganiseerd door KIVI KE – NNS, vond plaats op 8 november 2019 op de INVITEZ at the Hospitality Campus van ROC Mondriaan in Den Haag. Sprekers waren Jan Bens, dr. Georg Schwartz en dr. Christina P. Tanzi. Ongeveer veertig bezoekers woonden het symposium bij.**

Bens presenteerde een overzicht van de drie grote nucleaire ongelukken in een inleiding getiteld *Some Personal Thoughts*. Allereerst was er het ongeluk Three Miles Island (TMI) aan de oostkust van de Verenigde Staten in 1979. Het ongeval leidde tot belangrijke concrete vervolgstappen: Het Institute of Nuclear Power Installations (INPO) werd opgericht met het doel om scholing en training voor medewerkers te professionaliseren. En er werd besloten tot 'peer review', om elkaar scherp te houden binnen de sector. Dat alles onder het voornemen 'never again'. Op 26 april 1986 was het weer raak. Toen ging het op ernstige wijze fout in

Chernobyl in Oekraïne. Daar bleek van alles mis en/of slecht georganiseerd. Er was sprake van ontwerpfouten en zelfs een containment voor de reactor ontbrak. Dit had tot gevolg dat alle vrijkomende straling direct in de omgeving vrijkwam. Er was sprake van geheimhouding en de noodzakelijke evacuatie van omwonenden kwam veel te laat op gang. Naar aanleiding van dit ongeluk werd de World Association of Nuclear Operators (WANO) opgericht voor meer en betere peer reviews ter bevordering van de veiligheidscultuur. En de stresstest deed zijn intrede op nucleair terrein. Men zag nog geen aanleiding tot belangrijke constructieve

aanpassingen. Wederom werd een 'never again' uitgesproken.

## TSUNAMI

Het duurde 25 jaar voor er opnieuw sprake was van een groot incident. Maar nu was de oorzaak een externe gebeurtenis: een zware aardbeving gevolgd door een tsunami bij de kerncentrale van Fukushima. De reactoren hadden de aardbeving goed doorstaan. Maar de vloedgolf was zo hoog dat die met gemak de ter plaatse aangelegde dijk passeerde en de kerncentrale overspoelde. De essentiële noodkoeling viel weg en daardoor ging het onvermijdelijk mis bij de reactoren. De vrijgekomen straling was gegeven de omvang beperkt en leidde tot relatief weinig stralingsbesmetting bij mensen. Alhoewel je die hoeveelheid eigenlijk verwaarloosbaar wilt hebben. In reactie op dit ongeval kwam het besef dat ook externe gebeurtenissen effect kunnen hebben. Dat leidde in elk geval tot herziening van basis-ontwerpaannames en tot stresstesten mede gericht op externe 

oorzaken. Wat resteert is de vraag wat de rol van de toezichthouder is geweest die op de hoogte was van tsunamigevaar in de regio, ook van tsunamís die hoger zijn dan de 'beschermingsdijk' bij Fukushima. Wereldwijd (en zeker in Europa) waren er nog andere gevolgen. Nucleair kreeg opnieuw een klap in het publieke beeld van de sector. Duitsland en België besloten nucleair volledig uit te faseren. Men verwacht in de toekomst volledig aan de vraag naar energie te kunnen voldoen met 'zon en wind'.

### **WATERSTOFEXPLOSIË**

Schwartz ging in op de maatregelen die in reactie op het Fukushima-ongeluk werden genomen. Merkels besluit tot uitsluiting in Duitsland werd heel snel genomen inclusief

het bijbehorende tijdspad. Zwitserland koos ook die weg maar dan zonder tijdspad. Daar blijft het dus voorlopig nog even bij 'van plan zijn'. België is op dat punt concreter dan Zwitserland, maar het tijdspad is minder 'hard' dan het Duitse. Daarnaast ging Schwartz in op het aspect vrijgekomen straling. Die bleek veel beperkter dan waar men in eerste instantie voor vreesde. Er kunnen dus vraagtekens geplaatst worden bij de snelheid en de omvang van de doorgevoerde evacuatie. Eigenlijk was er voldoende tijd om eerst wat afstand te nemen en pas (grootschalig) te evacueren als dat noodzakelijk zou blijken op grond van feitelijke metingen. Nu blijkt dat de factor angst belangrijker is geweest dan het feitelijke stralingsniveau bij de beslissing tot evacuatie. Een aparte

plek verdient de voordracht van Tanzi. Zij onderzocht wat er zich afspeelde in en rondom unit 4, waar een zware ontploffing plaatsvond die het gebouw volledig vernielde. En dat terwijl deze unit 4 ten tijde van het ongeluk al meer dan honderd dagen buiten bedrijf was. Tijdens het ongeluk was het onmogelijk om in de buurt van de unit te komen, om uit te zoeken wat er daar was gebeurd. Achteraf werd de analyse gemaakt. Tanzi analyseerde dat er sprake moet zijn geweest van een waterstofexplosie. Dat waterstof was ontstaan door reactie van tot 1.200 °C verhitte stoom met zirkonium in het opslagbassin van uitgewerkte splijtstofstaven. **K**

*Gerrit Boersma*

## **CONFERENTIE IAEA: ERVARINGEN DELEN, MAAR OOK VOORUITKIJKEN**

**Het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA) organiseerde in samenwerking met het Joint Research Centre van de Europese Commissie de internationale conferentie 'Working Together to Enhance Cooperation'. Deze conferentie vond van 4 tot 7 november 2019 plaats in Den Haag. ANVS-bestuursvoorzitter Jan van den Heuvel: "Waar het uiteindelijk om gaat is dat gedeelde ervaringen ook daadwerkelijk in de praktijk van de uitvoering worden toegepast door onze mensen."**

De regelgevende instanties uit de hele wereld op het gebied van nucleaire veiligheid en beveiliging en stralingsbescherming waren aanwezig om kennis, ervaringen en geleerde lessen uit te wisselen. Uit de conferentie bleek dat het vooral belangrijk is om goed naar de toekomst te kijken, zodat de instanties voorbereid kunnen zijn op problemen waarmee zij later geconfronteerd kunnen

worden. De conferentie werd voor de vijfde keer gehouden en Nederland was dit keer gastheer. De bestuursvoorzitter van de ANVS Jan van den Heuvel gaf in zijn toespraak op de openingsdag aan dat er in het domein van nucleaire veiligheid en beveiliging veel conferenties worden gehouden om ervaringen en goede voorbeelden te delen. 'Dat is heel belangrijk. Echter: Waar het uiteindelijk

om gaat is dat deze ervaringen ook daadwerkelijk in de praktijk van de uitvoering worden toegepast door onze mensen.' Van den Heuvel wees daarbij op het probleem van afgedankte hoogradioactieve bronnen die soms in schrootladingen worden aangetroffen. Nederland heeft, als één van de grootste schrootimporteurs ter wereld, daar ook mee te maken. De ANVS wijdde tijdens





➤ Bestuursvoorzitter Jan van den Heuvel tijdens de conferentie.

de conferentie een presentatie hieraan, waarbij onder andere het belang van internationale samenwerking hiervoor werd benadrukt.

### CRISISVOORBEREIDING

Een speciale paneldiscussie tijdens de conferentie werd gewijd aan crisisbeheersing bij kernongevallen en stralingsongevallen. Diverse panelleden, afkomstig uit alle windstreken, schetsten op basis van de ervaringen in eigen land hun visie op crisisvoorbereiding. Meer aandacht voor de (psycho)-sociale consequenties voor de bevolking bij het afwegen van te nemen maatregelen werd belangrijk gevonden door de deelnemers van het panel en van de conferentie. Verder werd het oefenen van de plannen op alle niveaus door de panelleden benadrukt.

### KENNIS

Aan het eind vatte de president van de conferentie, Carl Magnus Larsson,

de conclusies samen. Sinds de vorige conferentie in Wenen in 2016 zijn er veel verbeteringen doorgevoerd, vooral in landen die hun regelgeving op één lijn hebben gebracht met internationale goede voorbeelden. Maar er is ook nog steeds een aantal aandachtspunten. Zo blijft het behouden en het ontwikkelen van deskundigheid van groot belang. Nieuwe nucleaire en medische toepassingen komen in de huidige tijd zeer snel tot ontwikkeling. Tijdens de presentatie over medische toepassingen bleek dat de deelnemers de kennis hierover goed moeten volgen, zodat ze hierop in kunnen spelen met passend beleid en regelgeving.

### EÉN AANPAK

In de nucleaire sector verschuift de aandacht van het opbouwen van nieuwe nucleaire installaties naar de ontmanteling van buitengebruik gestelde installaties. Ook het verouderingsbeheer van kernreactoren is een belangrijk aandachtspunt. Veel

landen houden de reactoren langer in gebruik dan oorspronkelijk was voorzien. Verder bleek dat veiligheid en beveiliging integraal moeten worden benaderd, en niet los van elkaar met voor ieder domein eigen beleid en regelgeving. Eén aanpak dus, waarbij het niet alleen gaat om een technische benadering en het hebben van excellente technische kennis, maar ook om de juiste cultuur, menselijk gedrag en het functioneren van de organisatie.

### TOEKOMST

Tijdens de conferentie bleek hoe belangrijk internationale samenwerking, het delen van ervaringen en geleerde lessen en bepalen van de effectiviteit is, om wereldwijd verbeteringen te kunnen doorvoeren. Maar het is nog belangrijker om ook goed naar de toekomst te kijken. Daardoor kunnen de toezichthouders de problemen aanpakken waarmee zij in de komende decennia geconfronteerd kunnen worden. De volgende conferentie van het IAEA over Effective Nuclear and Radiation Regulatory Systems wordt gehouden in 2022. **K**



# VOORUITZICHTEN NUCLEAIRE STROOMPRODUCTIE HERZIEN IN THE NUCLEAR FUEL REPORT

Het Nuclear Fuel Report wordt geschreven door een werkgroep die bestaat uit vertegenwoordigers van de lidorganisaties binnen de WNA. Daarnaast verkrijgt de WNA haar informatie van verscheidene externe bronnen. Bemoedigende berichten in het rapport voor de nucleaire sector zijn onder meer dat Frankrijk zijn energiepolitiek heeft aangepast, de geplande reductie van kernenergie uitstelt en akkoord is gegaan met de verlenging van de bedrijfsduur van bestaande kernreactoren boven de veertig jaar. In de VS beginnen wetgevers van verschillende staten maatregelen goed te keuren die de bedrijfsvoortzetting van kernreactoren garandeert en onderschrijven daarmee de belangrijke rol van kernenergie bij de productie van koolstofarme elektriciteit.

Tegelijkertijd is het proces gestart voor een tweede verlenging van een bedrijfsvergunning voor Amerikaanse reactoren waarmee ingebruikstelling tot 80 jaar wordt toegestaan. Zowel China als India hebben volgens het rapport omvangrijke uitbreidingsprogramma's en het vooruitzicht voor nieuwe reactoren is in veel landen gunstig, waaronder Turkije, Bangladesh en Egypte die bouwprojecten zijn gestart. En in diverse andere landen zoals Oezbekistan, Kazakstan en Polen

**De prognoses van de World Nuclear Association (WNA) voor de groei van nucleaire stroomproductie is voor het eerst in acht jaar naar boven bijgesteld op grond van gunstiger beleidskaders in een aantal landen. Dit blijkt uit de negentiende editie van het WNA report dat elke twee jaar wordt opgesteld. Op termijn wordt een verdubbeling van de uraniumproductie voorspeld.**

die een duidelijke interesse tonen voor de ontwikkeling van nucleaire programma's.

## DRIE SCENARIO'S

De WNA onderscheidt verschillende scenario's; het Reference, Upper en Higher Scenario's. De Upper en Reference Scenario's laten een wereldwijde groei van nucleaire capaciteit zien tot 2040 en dat in een sneller tempo dan op enig moment sinds 1990. Het betreft een groei die voornamelijk komt door de extensieve bouwprogramma's voor reactoren in China, India en andere landen in Azië. Hierbij zij opgemerkt dat de relatieve kosten van kernenergie grotendeels onveranderd blijven over de genoemde periode: 'Kernenergie blijft een belangrijke rol spelen in de energiemix in een tijd waarin hernieuwbare energiebronnen op grote schaal

gesubsidieerd worden. Elektriciteitsmarkten blijven groeien zonder duidelijke trend. Terwijl sommige landen doorgaan met de herstructurering en liberalisering van hun elektriciteitsmarkten erkennen veel overheden de beperking van marktliberalisering en introduceren marktmaatregelen bedoeld om veilige en betrouwbare stroomvoorziening te realiseren en stabiele netten voor de lange termijn te garanderen.'

## RUIM ONDER 2°C

Terwijl de voorziene groei in het Reference Scenario gematigd is met een capaciteitsgroei tot 569 GWe in 2040, verdubbelt de huidige nucleaire capaciteit bijna in het Upper Scenario tot 776 GWe. In het Lower Scenario blijft het aandeel kernenergie grotendeels gelijk op het huidige niveau van 402 GWe. In haar

commentaar op de publicatie van The Fuel Report zei Agneta Rising, Director General WNA: "Om het Harmony Goal te bereiken, om in 25 procent van de mondiale stroomproductie voor 2050 te voorzien, is een versnelling nodig van nieuwbouw in nucleair, hoger dan is voorgesteld in het Upper Scenario, wat op zijn beurt zal leiden tot een grotere behoefte aan uranium, verrijking, splijfstofproductie, transport en verbruikte splijfstof services. Belanghebbenden binnen de nucleaire splijstofcyclus moeten voorbereid zijn om te voldoen aan een mogelijk grote toename van de vraag om het Harmony-doel te bereiken." De Harmony goal maakt deel uit van het Harmony Programme een wereldwijd initiatief van de nucleaire industrie. "Het Harmony Programme wordt geleid door de WNA en wordt ondersteund door onze leden vanuit meer dan 180 bedrijven", aldus Jonathan Cobb, Senior Communication Manager WNA. Het mondiale Harmony Goal van de nucleaire industrie is gericht op het bereiken van 25 procent aandeel kernenergie in de mondiale elektriciteitsvoorziening voor 2050. Hiermee wil de industrie bijdragen om de wereldwijde stijging van de temperatuur ruim onder de 2 graden Celsius te houden.

## VERDUBBELING

De uitbreiding van nucleair heeft gevolgen voor de uraniummarkt die in de afgelopen jaren werd gekenmerkt door overproductie. Dat heeft geleid tot een aanzienlijke afname in productieniveaus bij bestaande mijnen en een scherpe afname in investeringen in de ontwikkeling van nieuwe en bestaande mijnen. De drie scenario's van uraniumvoorziening, corresponderend met bovengenoemde scenario's tonen aan dat de capaciteit van alle op dit moment bekende mijnprojecten (huidige en stilgelegde mijnen, projecten in ontwikkeling, gepland of beoogd) op zijn minst moet worden verdubbeld aan het einde van de prognoseperiode. Verder wordt de behoefte aan nieuw primair aanbod van uranium nog

nijpender omdat een aantal oudere mijnen in het tweede decennium van deze eeuw uitgeput raakt. Er zijn meer dan voldoende uraniumbronnen om aan de toekomstige vraag te voldoen. Echter, overproductie en geassocieerde lage uraniumprijzen voorkomen de nodige investeringen om deze bronnen in productie te nemen. De WNA acht het onwaarschijnlijk dat uraniumbronnen een beperkende factor zullen zijn voor de uitbreiding van nucleaire programma's om het Harmony Goal te bereiken. De relatieve bijdrage van secundaire levering aan het totaal aan uranium zal gaandeweg verdwijnen. Maar een grote component van secundaire levering is de commerciële voorraad die steeds belangrijker in de markt wordt omdat veel deelnemers voordeel proberen te krijgen van de huidige lage uraniumprijzen en verrijking en daarom hun voorraden vergroten. Het is dan ook te verwachten dat op de korte en middellange termijn potentieel leveringstekort gedekt wordt door commerciële voorraden. "Deze voorraden betreffen voorraden bij (nuts)bedrijven, producenten en andere marktdeelnemers voor verschillende redenen zoals overheidsbeleid, verzekeren van voorzieningszekerheid en leveringsafspraken, of een pure commerciële beslissing zoals wanneer een bedrijf of producent besluit om voorraden te maken vanwege aantrekkelijke prijzen. De onderlinge verhoudingen veranderen continu en zijn afhankelijk van hoe naar levering, vraag en uraniumprijzen wordt gekeken", zoals in het rapport staat.

## CENTRIFUGECAPACITEIT

De conversie-sector (het omzetten van de yellow cake tot het gas uraniumhexafluoride) laat naar de toekomst een tekort aan aanbod zien van 9.500 ton U aan conversiecapaciteit. Naar verwachting zal aanvullende capaciteit voor 2030 nodig zijn door de sterke groei in vraag. Binnen de verrijkingsector is de productiecapaciteit voldoende om aan de vraag te voldoen. Omdat centrifugecapaciteit in essentie modulair van karakter is, zou die makkelijk

zijn aan te passen aan een groeiende vraag. De splijststoffabrikanten zijn traditioneel concurrerend en dat zal toenemen met de stijgende vraag naar splijststof in Azië en afnemende vraag in het westen. Dit zou in potentie kunnen leiden tot een verandering van de levering van splijststof omdat handelaren welwillend zijn om van een huidige regionale aanpak naar een mondiale marktbenadering over te gaan. Dit kan ertoe leiden dat er een meer gebalanceerd evenwicht ontstaat in vraag en aanbod, met verhoogde concurrentie en verbeterde voorzieningszekerheid. De WNA verwacht alleen nieuwe verrijkingcapaciteit in China en dan ook alleen voor eigen gebruik. China kan volgens WNA zeker op termijn een mondiale SWU-leverancier – Separative Work Units worden, maar het is nog te vroeg om te zeggen op welke schaal verkoopactiviteit zal plaatsvinden en zelfs of nieuwe Chinese verrijkingcapaciteit voldoende zal zijn voor hun interne markt. SWU - Separate Work Units - hebben betrekking op de hoeveelheid arbeid/inspanning die er nodig is om uranium te verrijken. De WNA gaat er niet vanuit dat uitbreiding van verrijkingcapaciteit een bedreiging kan zijn voor bijvoorbeeld Urenco. 'Wanneer in het rapport gesproken wordt over Azië, dan wordt zeker ook buiten China gekeken. Er zijn vele toekomstige klanten en dat betekent dat er een markt zal zijn voor Urenco om hun services aan te kunnen bieden. Bovendien is verrijkingstechnologie zeer gecompliceerd, vereist het kennis en is extreem duur voor landen buiten China om in die regio grootschalig verrijking op te zetten.' Op de lange termijn vanaf 2040 kan de ontwikkeling van Gen-IV-reactoren zorgen voor een fundamentele verandering in het nucleaire landschap. Duidelijk is dat Gen-IV-reactoren veel efficiënter zijn. Ook het sluiten van de splijstofcyclus zal mogelijk worden wanneer reactoren in staat zijn om gebruikte splijststof, plutonium en voorraden verarmd uranium 'op te branden'. **K**

*Menno Jelgersma*



© Shutterstock

# INBEELD

## BESTRAALDE VACCINS HOUDEN VEESTAPEL GEZOND

**Ethiopië exporteert jaarlijks meer dan een miljoen stuks vee. Dit zou niet mogelijk zijn zonder nucleaire technologie. Om epidemieën te voorkomen moet de complete veestapel voor zowel export als eigen gebruik worden gevaccineerd tegen dierenziektes zoals mond-en-klauwzeer, schapen- en geitenpokken, kleine herkauwerspest (PPR), knopvelziekte (LSD) en vele andere besmettelijke ziektes.**

De vaccinaties zijn ontwikkeld en geproduceerd bij het National Veterinary Institute (NVI) in Ethiopië. De IAEA, in samenwerking met de Voedsel- en Landbouworganisatie van de Verenigde Naties (FAO) ondersteunen het werk: vaccins worden ontwikkeld om pathogenen te bestrijden en vervolgens geproduceerd voor binnenlands gebruik en voor de omliggende landen. De binnenlandse verspreiding is vooral van belang in afgelegen gebieden waar het vee ook met wilde dieren in contact kan komen. De werking van vaccins is gebaseerd op de immunrespons van een lichaam om zich tegen een toekomstige besmetting te kunnen wapenen. Bij sommige vaccins wordt gebruik gemaakt van levende micro-organismen zoals virussen. Bestraling maakt het micro-organisme onschadelijk zodat het ingeënte dier niet ziek wordt. Tegelijkertijd verandert de bestraling niets aan de structuur van het micro-organisme waardoor het immuunsysteem het pathogeen nog steeds herkent. Bestraling zorgt er bovendien voor dat de vaccins vrij zijn van een eventuele besmetting. Bijkomend voordeel van bestraling is dat er geen extra chemicaliën nodig zijn om de virussen te deactiveren wat de bestraalde vaccins een hoge kwaliteit geeft en voor een bredere immuniteit zorgt. Met nucleair afgeleide moleculaire technieken kunnen ook de karakterisaties van het DNA en RNA van virussen worden vastgesteld waarmee verschillende virusstammen zijn te onderscheiden. Deze technologie wordt ook gebruikt om een 'wild' virus tijdens een uitbraak te vergelijken met de nauw verwante virussen in het vaccin om als daartoe de noodzaak bestaat, het vaccin aan te passen. **K**

Bron: IAEA



# NA DE EAST- EN WEST- NU OOK EEN NORTH-TOKAMAK

© Shutterstock



**Na de EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) in China en de WEST (Wolfram Environment in Steady-state Tokamak) in Frankrijk heeft zich een nieuwe windrichting aan een Tokamak-ontwerp toegevoegd. Met de introductie van NORTH (NORic Tokamak, natuurkunde en engineeringprogramma's) biedt de TU van Denemarken studenten de gelegenheid ervaring op te doen met alle aspecten van het creëren van een plasma in een Tokamak.**

Wat begon als het ST-25 prototype bij het fusie startup Tokamak Energy Ltd. (VK) kreeg een tweede leven als een onderzoeks- en trainingsinstrument op de Technische Universiteit van Denemarken (DTU).

De kleine bolvormige Tokamak – met een plasma radius van 25 centimeter en een volume van ongeveer 100 liter – is in permanente bruikleen van Tokamak Energy, aldus Søren Bang Korsholm die als senior wetenschapper aan het DTU is verbonden. Het apparaat arriveerde vorig jaar verdeeld over vijf pallets en werd opnieuw geassembleerd en aangesloten door het DTU-team in de kelder van gebouw 309 op de DTU-campus in Kopenhagen. Studenten hebben binnen verscheidene projecten de machine inmiddels voorzien van een reeks aan diagnostische instrumenten voor het meten van dichtheid, temperatuur en het magnetisch veld. “We

zijn heel blij dat we op de universiteit, die werd gesticht door de persoon die elektromagnetisme ontdekte (Hans Christian Ørsted, 1777-1851), nu de mogelijkheid hebben om een bijdrage te leveren aan de praktische training van de fusiewetenschappers en -ingenieurs die fusie-energie voor het net mogelijk gaan maken.”

NORTH produceerde op 23 augustus 2019 officieel het eerste plasma gedurende zeven seconden tijdens de recente inauguratie bij de DTU, precies zoals was verwacht. ITER Director-General Bernard Bigot volgde het evenement via video-conferentie: “Vanaf vandaag is DTU toegetreden tot de wereldwijde familie van werkende Tokamaks, waar ITER snel ook toe gaat behoren. We zijn allen trots om deel uit te maken van deze grote zoektocht die voor meer dan vijf decennia de droom is van wetenschappers en ingenieurs. We zijn nu dichterbij dan

ooit om deze droom te verwezenlijken. Ik wens u voor de komende jaren het beste toe op het gebied van fusie-onderzoek aan de DTU.” Søren: “Hoewel de machine beduidend kleiner is dan ITER, is de basis plasmafysica hetzelfde, wat het voor onze studenten mogelijk maakt om experimenten uit te voeren waarmee ze geheel voorbereid zijn om bij de grotere Europese fusie-labs te werken.” De nieuw verworven machine zal naar verwachting een verhoogde aantrekkingskracht hebben voor het natuurkundig fusieplasma-programma aan de universiteit, maar dat niet alleen. Het team wil NORTH beschikbaar maken voor aankomende ingenieurs met een bredere interesse, zoals: diagnostiek, materiaalkunde, energiesysteem-analyses en zo meer. Hiermee zal de faciliteit in zo veel mogelijke verschillende toepassingen voor fusie-onderzoek kunnen voorzien. **K**

Bron: ITER



## OOK IN 2020 WERELDWIJDE ACTIE VOOR KERNENERGIE

➤ Sympathisanten voor kernenergie demonstreren voor het paleis op de Dam in Amsterdam tijdens wereldwijde actie.

**➤ Ook in 2020 wordt er wereldwijd actievoerd voor kernenergie als klimaatvriendelijke energiebron, na de succesvolle actiedag Stand up for Nuclear afgelopen najaar. Vele honderden mensen in 33 steden over de hele wereld, gingen toen, op 20 oktober 2019, de straat op om voor kernenergie als schone energiebron te pleiten en ze bereikten vele duizenden mensen op de manifestaties. Alleen in Nederland al honderdduizenden via de media.**

In Amsterdam waren er toespraken op de Dam, georganiseerd door de Stichting Ecomodernisme die de Nederlandse nucleaire energiesector en sympathisanten voor het paleis bij elkaar bracht met als doel een beter imago van kernenergie te bewerkstelligen. Die bijeenkomsten zijn belangrijk, zegt Alexandra Gates van Environmental Progress, de Amerikaanse motor achter het wereldwijde Stand up for Nuclear, om ruimte te creëren voor debat en om mensen te wijzen op de

milieuvoordelen en de voordelen van kernenergie voor de lokale economie en de wereldeconomie.

### **KERNENERGIE ONTDOEN VAN NEGATIEF IMAGO**

Wereldwijd zijn de deelnemers ervan overtuigd dat we het zonder kernenergie niet gaan redden en daarom is het ook noodzakelijk kernenergie te ontdoen van haar negatieve imago, zegt ook voorzitter Olguita Oudendijk van de Stichting

Ecomodernisme die Stand up for Nuclear in Amsterdam organiseerde. "Er ligt een Kamermotie die de regering opdraagt om kernenergie als energiebron te onderzoeken in de mix van oplossingen om het CO<sub>2</sub>-probleem te lijf te gaan. Het is zaak dat dit snel en serieus gebeurt want we hebben niet meer alle tijd van de wereld. Nog steeds bestaat meer dan 80 procent van alle energie wereldwijd uit fossiele brandstoffen en we zitten middenin een klimaatcrisis."

### **"ALLE CO<sub>2</sub>-ARME OPTIES OPENHOUDEN."**

Ook directeur Ad Louter van Urenco ziet een publiek debat over kernenergie zonder taboes met graagte komen en juicht Stand up for Nuclear toe. Louter: "Als we in Nederland serieus aan de gang willen om CO<sub>2</sub>-emissies terug te dringen, moeten we alle CO<sub>2</sub>-arme opties openhouden. Naast hernieuwbare bronnen zoals zon en wind, is er behoefte aan een stabiele baseload. Kernenergie is hiervoor uitermate geschikt omdat het efficiënt, veilig en CO<sub>2</sub>-arm is. Leg alle CO<sub>2</sub>-arme bronnen langs dezelfde ➤

meetlat en creëer een bestendig beleid voor investeerders en burgers. Dan bewaken we onze energie-onafhankelijkheid, onze leveringszekerheid én reduceren we onze CO<sub>2</sub>-emissies.”

## **VOLGEND JAAR WEER STAND UP FOR NUCLEAR**

Stand up for Nuclear gaat volgend jaar zeker weer gebeuren, zegt Gates. “We gaan in 2020 een dag of misschien zelfs een week of een maand weer van ons laten horen.” De Nederlandse Stichting Ecomodernisme vraagt al reeds in dat jaar op 30 januari opnieuw aandacht voor kernenergie tijdens het congres Cornucopia in Eindhoven. Dan zullen de ecomodernisten ook uit de doeken doen waar het ecomodernisme voor staat en dat we niet minder energie maar juist mee energie nodig hebben om ervoor te zorgen dat 800 miljoen mensen uit de armoede kunnen komen. Ook verschijnt volgend jaar een nieuw boek. Het boek Ecomodernisme, het nieuwe denken over groen en groei onder redactie van

Marco Visscher staat al op de site. Rond de zomer moet dat worden aangevuld met - en dat is een werktitel - *Meer! Naar een wereld van overvloed*, onder redactie van wetenschapsjournalist en documentairemaker Hidde Boersma. Het gaat ongeveer zestien essays van tien denkers bevatten. Ook dat boek zal via de site [www.ecomodernisme.nl](http://www.ecomodernisme.nl) te bestellen zijn.

## **TEVREDENHEID**

Olguita Oudendijk is tevreden met de actiedag van 20 oktober. Aandacht werd in Nederland verkregen door een interview met CEO Michael Shellenberger van Environmental Progress in De Telegraaf de dag voor de actie. In Amsterdam waren, net als op veel andere plekken op de aardbol, tientallen mensen op de been ook vanuit de sector. De ecomodernisten hielden verschillende toespraken waarin benadrukt werd dat ook instellingen als het IPCC, de IEA en bestuurders als minister Wiebes van Klimaat en first vice-president van de

Europese Commissie Frans Timmermans, ook zeggen dat kernenergie deel uit kan maken van de oplossing van het klimaatprobleem.

Chris Breuer, manager communicatie en PR van Urenco in Duitsland koos ervoor naar Amsterdam te gaan vanuit de vestiging in Gronau en niet naar Berlijn: Amsterdam is dichterbij. “We zijn met ongeveer tien personeelsleden gegaan; we hebben de organisatie geholpen met het opzetten van het event en hebben prachtige liederen gezongen met feiten over kernenergie.”

Hij is blij dat Olguita Oudendijk in haar speech mythes over kernenergie doorpriekte en liet zien hoe kernenergie een oplossing kan zijn in het klimaatdebat. “Dat laat zien dat de taboes langzaam doorbroken worden en dat het onderwerp meer open wordt besproken. Het is ook niet niks dat over de hele wereld in 33 steden gewone mensen de straat op gaan om voor kernenergie te pleiten.” Volgens Breuer hebben sommige Urencomedewerkers ook familieleden meegebracht naar

✎ *Toespraak van Olguita Oudendijk, voorzitter van de Stichting Ecomodernisme*





Amsterdam en is onderling na de demonstratie het onderwerp nog flink besproken in Amsterdam. Hij kijkt al uit naar de editie van 2020.

## WERELDWIJD PLEIDOOI VOOR KERNENERGIE

Die positieve boodschap over kernenergie werd op 20 oktober over de hele wereld vertolkt, nadat in voorgaande jaren een Nuclear Pride werd georganiseerd in München en in Brussel. In Parijs waren honderdvijftig mensen op de been tijdens de manifestatie die werd gecoverd door de Duitse tv en door Canal +. In Zuid-Korea waren er honderd mensen op de been bij een manifestatie langs de Han-rivier in Seoel, die met tweeduizend mensen hebben gesproken. Daar berichtten het persbureau Yonhap en meerdere grote media, zoals ChosunBiz, over de manifestatie. In Australië was de manifestatie georganiseerd door de liberaal-democratische politicus David Limbrick. Die gelooft dat Australië ook kernenergie moet produceren in plaats van het uranium alleen te exporteren. Daar was de manifestatie op de nationale tv-zender Channel 9. In Manila gingen tweehonderd mensen in de stromende regen de straat op en na het evenement zijn er op universiteiten gespreksgroepen opgezet om de discussie over leiderschap in nucleaire energie verder te voeren. Gesprekken waren er ook in Denemarken (tweehonderd deelnemers) waar mensen zich afvroegen hoe ze de publieke opinie konden veranderen zodat de Groenen ook pro-nucleair zouden moeten gaan. In Khartoum werd een manifestatie georganiseerd. En aan de andere kant van de wereld, in Argentinië in de steden Buenos Aires en Bariloche werd de manifestatie geheel door vrouwen georganiseerd. Daar zijn ze al bezig met de organisatie van Stand up for Nuclear van 2020. **K**

Simon Trommel

# COLUMN



## THE TIMES THEY ARE A-CHANGIN', DAMES EN HEREN

OK, nog één keertje dan: ultrahoge energiedichtheid; geen impact op milieu, klimaat, en schaarse ruimte; geen stikstofuitstoot; piepklein beetje afval dat duizend keer veiliger wordt opgeborgen dan al het overige, duizend keer omvangrijkere industriële afval; dag en nacht en in weer en wind beschikbaar; goedkoop en superveilig (de Fukushima

evacuatie heeft meer leed veroorzaakt dan voorkomen; Chernobyl is allang een wonderschoon natuurgebied).

Dit is, puntsgewijs, de waardepropositie van kernenergie, dames en heren. Je zou ook kunnen zeggen: Atoms for Peace is de grootste triomf uit de energiegeschiedenis. Of neem deze: met pakweg tien moderne kerncentrales is onze nationale energietransitie gefikst (als ook de restwarmte wordt benut en twee of drie centrales waterstof produceren). Voortreffelijke verhalen kortom, waar geen speld tussen te krijgen is. En waarom horen we al dat voortreffelijks dan nooit? Waarom krijgen Minnesma (Urgenda), Thunberg (in Zweden al vrouw van het jaar), en een stoet van groene profeten en transitiehoogleraren alle aandacht? Welnu, hierom: zij hebben geleerd een verhaal te vertellen. Er is een probleem, de ondergang van de planeet, er is een schuldige, de staat, Shell, voorgaande generaties, en er is een oplossing: de groene ideologie. Tja. Strafexpedities vinden weerklank.

Wij daarentegen, van de kernenergie, hebben een schitterend verhaal, maar weten dat nog steeds niet te vertellen. Wij zijn te braaf, te gestructureerd, te introvert, te technisch. Dat werkt uitstekend binnen kerncentrales, maar niet daarbuiten. Boeren, bouwers, onderwijzers, verplegers en ook de Zwarte Pieten begrijpen inmiddels hoe onze perceptie maatschappij werkt. Wie overtuigen wil, moet een probleem creëren, een schuldige aanwijzen, en dat als drukmiddel gebruiken. Op het Malieveld, voor het provinciehuis, desnoods voor de rechter.

Ja, er waart weer een revolutionaire geest door de wereld, dames en heren. Bob Dylan is terug; The Times They Are A-Changin'. Zonder radicale koerswijziging in het energiebeleid komt er écht geen nieuwe kerncentrale meer in Nederland, en in Europa evenmin. Dan is het hier einde verhaal. Waar wachten we nog op? **K**

André Wakker

---

*Dr.ir André Wakker is zelfstandig organisatieadviseur, en energiedeskundige. Voorheen werkte hij als business developer bij achtereenvolgens Shell, ECN, en NRG. Als levenslang voorvechter van kernenergie mengt hij zich regelmatig in het energietransitie debat. Hij is afgestudeerd in de kernfysica, en gepromoveerd op fluctuaties in extreem onderkoeld water.*



**“WE MOETEN ALLES  
OP ALLES ZETTEN  
OM DE RISICO'S VAN  
KLIMAATVERANDERING  
TEGEN TE GAAN.”**

➤ Thies Beckers, the nuclear humanist

© Memo Jelgersma

# TIEN NIEUWE KERNCENTRALES VOLDOENDE VOOR REDUCTIE 100 MEGATON CO<sub>2</sub>-EMISSIONS

**➤ Thies Beckers, the nuclear humanist, heeft inmiddels vier boeken geschreven over klimaatverandering en energie. Hij produceert filmpjes op YouTube en houdt voordrachten over de bijdrage die kernenergie kan leveren binnen een CO<sub>2</sub>-vrije energiemix. Onlangs schreef hij een rapport over de rol die kernenergie kan leveren voor de Nederlandse CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening. “Tien nieuwe kerncentrales kunnen zorgen voor een reductie van bijna 100 megaton aan CO<sub>2</sub>-emissies.”**

Nederland is een relatief klein maar geïndustrialiseerd land met een groeiende bevolking van 17 miljoen mensen. Volgens het CBS bedroegen de CO<sub>2</sub>eq-emissies in 2017 15,4 ton per hoofd van de bevolking. De totale jaarlijkse CO<sub>2</sub>eq-emissie van Nederland lag in datzelfde jaar tussen de 260 en 270 megaton. Volgens Beckers concludeerde het CBS ook dat de totale emissies 193 megaton bedroegen. Koolstofdioxide-equivalent (CO<sub>2</sub>eq of CO<sub>2</sub>e) is een maat om aan te geven hoeveel een gegeven hoeveelheid broeikasgas bijdraagt aan de opwarming van de aarde, gebruikmakend van een equivalente concentratie CO<sub>2</sub>.

Er zijn voorstellen om de uitstoot met 49 procent te verminderen – ten opzichte van de uitstoot in 1990 – in 2030 (41 Megaton CO<sub>2</sub>eq). Beckers: “Het is hierbij belangrijk om op te merken dat dit een politieke keuze is en dat het met deze 41 megaton niet over de 49 procent gaat van de totale uitstoot in 1990 die 222 megaton bedroeg.” Het voorstel betreft het beëindigen van het gebruik van aardgas voor verwarming, elektrificatie van het transport, en het vervangen van fossiele brandstoffen (compleet uitbannen van steenkool) middels stroomgeneratie door wind- en zonne-energie. Het CBS schat dat investeringen tussen de 80 en 90 miljard euro nodig zijn om deze doelen te bereiken, wat een toename in jaarlijkse overheidsuitgaven inhoudt van 3 tot 4 miljard euro per jaar.

## **VIJF BESCHIKBARE LOCATIES**

Beckers stelt een alternatieve route voor die weliswaar afhankelijk is van de inzet van zonne- en windenergie, maar ook minder beslag op ruimte en materiaal wil leggen door kerncentrales in te zetten voor een betrouwbare basislast in de toekomstige energiemix in Nederland. In Nederland zijn drie kernreactoren in bedrijf, waarvan alleen de Kerncentrale Borssele voor de productie van stroom zorgt. In de jaren 70 van de vorige eeuw, toen naast de KCB ook de kerncentrale in Dodewaard nog in bedrijf was, wees de overheid 12 locaties aan voor

de bouw van nieuwe reactoren, waarvan er vijf nog steeds beschikbaar zijn: Borssele 2, Maasvlakte 1 en 2, Eemshaven 1 en 2. Om aansluiting op het net mogelijk te maken zou aanpassing van de infrastructuur voor energietransmissie noodzakelijk zijn. “Maar dat geldt ook wanneer er wordt overgegaan op grootschalige renewables”, vult Beckers aan. In 2017 werd in Nederland 116,4 terawattuur aan elektriciteit opgewekt. Voorspellingen laten zien dat de vraag naar stroom in 2030 ergens tussen de 115,6 en 138,4 terawattuur per jaar zal bedragen. Nieuwe reactoren moeten volgens Beckers wel aan een aantal voorwaarden voldoen: Generatie III-specificaties, vergunningen moeten zijn verleend en ontwerpen klaar voor constructie en de voorkeurkeuze voor reactoren met grote capaciteit vanwege beperkte locatiemogelijkheden (1.200+ MWe). Typen reactoren die hiervoor in aanmerking zijn: APR 1400 (12 stuks), AP 1000 (13 stuks), EPR (10 stuks) of de ABWR (9 stuks).

### SLUITING FOSSIEL IS HAALBAAR

Beckers benadrukt nog eens dat kerncentrales geen CO<sub>2</sub>-uitstoot hebben. Alleen tijdens de bouw van de centrale, bij de productie van splijtstof en voor het onderhoud komen broeikasgassen vrij, maar ze zijn daarin vergelijkbaar met zonne- en windenergie. De jaarlijkse stroomvraag is enkele terawatt-uren hoger dan in ons land wordt geproduceerd. Elektriciteit wordt daarom constant geïmporteerd vanuit België, Duitsland, VK en Denemarken. In het ontwerp van Beckers kunnen kerncentrales met de grootste capaciteit (EPR) alle kolen- en bijna alle gascentrales vervangen en daarmee tussen 55 en 95% van alle steenkool- en gasemissies doen verminderen. “Kleinere kerncentrales zijn minder effectief. Als we kans zien om daarbij het aandeel renewables te laten stijgen, zal de sluiting van steenkool-, gas- en biogascentrales haalbaar worden”, licht Beckers toe.

### GEMIDDELDE BOUWTIJD 8,2 JAAR

Het opnemen van tien nieuwe kerncentrales in de energiemix kan leiden tot een reductie

van ruim 36 tot 91 megaton CO<sub>2</sub>-emissie, waarmee de ambitie van de overheid van 41 megaton per jaar in 2030 in het gunstigste geval meer dan verdubbeld is. Beckers: “Ook zou hiermee een belangrijke stap richting een koolstofneutrale economie zijn genomen. Naast het opwekken van stroom kunnen kerncentrales een belangrijke bijdrage leveren aan de behoefte aan proceswarmte. Verder zullen honderden tot duizenden mensen werkzaam kunnen zijn in de nucleaire sector en daarmee een grote bijdrage aan de economie kunnen geven.” Vaak wordt gezegd dat de bouwtijd van kerncentrales erg lang duurt. De vraag is of dit op waarheid is gebaseerd. “Als je kijkt naar de IAEA-PRIS-data dan zie je dat de gemiddelde bouwtijd voor kerncentrales 8,2 jaar bedraagt. Slechts 22 procent van alle centrales duurde meer dan 10 jaar.” Beckers adviseert gebruik te maken van internationale expertise en ervaring en te gaan voor bestaande en beproefde ontwerpen. Hij verwijst naar de vier APR1400 eenheden die nu in de Verenigde Emiraten worden gebouwd onder de supervisie van KEPCO (Korean Electric Power Corporation). Daarnaast zijn er de EPR (een gereed ontwerp, verscheidene in aanbouw en nog meer op de tekentafel), de AP1000 (vier gereed, vier in aanbouw en meerdere gepland) of de ABWR, waarvan er vier in bedrijf zijn en de APR1400

### PROCESWARMTE

Nederland heeft een aantal energie-intensieve industrietakken: staalproductie, kunstmestproductie, chemische industrie en olieraffinage. Het is moeilijk om de industrie te ontkolen omdat ze voor een groot deel afhankelijk zijn van proceswarmte in plaats van stroom. De meeste warmte komt van aardgas. Beckers ziet dat we ook hoge temperatuurreactoren (HTR) kunnen inzetten voor de productie van warmte. Dit zou de Nederlandse economie minder afhankelijk maken van aardgas zonder dat het afstand zou moeten nemen van het mondiale top-gasdistributienet. “Daarnaast kunnen

HTRs worden gebruikt voor de productie van waterstof dat het aardgas zou kunnen vervangen”, voegt Beckers toe.

### ZES VOORWAARDEN

Na een kostenafweging komt Beckers in zijn Conclusie tot de constatering dat kernenergie zeker niet de duurste optie is om het Nederlandse stroomnet te ontkolen en de concurrentie met zon en wind goed aangaat. “Daarbij voorziet nucleair in een stabiel systeem en kan met de geproduceerde warmte ook in andere behoeftes worden voorzien.” Zonne-energie lijkt wat kosten betreft ongeveer op dezelfde hoogte uit als nucleair uit te komen maar blijkt toch duurder bij gelijke mededingingsvoorwaarden. “Ik denk dat het haalbaar is om alle kolengestookte centrales vanaf 2030 te vervangen door vijf tot tien nieuwe kerncentrales. Tien nieuwe kerncentrales kunnen zorgen voor een reductie van bijna 100 megaton aan CO<sub>2</sub>-emissies”, aldus Beckers. Beckers is niet tegen de ontwikkeling van wind en zon. “Door alle opties te ondersteunen, inclusief nucleair, hoeft je ook geen keuze te maken voor ‘first of a kind project’.” Alle opties en hun ontwikkelingen dragen bij aan het terugdringen van de schade die we het klimaat hebben aangedaan. Beckers geeft nog zes voorwaarden voor een succesvolle implementatie van nucleair: financier nieuwe energie-infrastructureur met goedkope (overheids) leningen om de ontwikkelingskosten laag te houden, koop een product geen project, stel een strict tijdschema vast, focus op toenemende efficiëntie, werk met internationale experts en wees bereid tot kennisoverdracht naar toekomstige arbeidskrachten. **K**

*Het rapport Comparative Cost Analysis for Dutch Nuclear Plant Rollout vs Wind & Solar Rollout is te downloaden via: [tiny.cc/421kgz](https://tiny.cc/421kgz) - via QR-code:*





# NUCLEAIRE GENEESKUNDE: .. VAN TECHNIEK TOT PATIËNT



**Op 1 november 2019 werd in The Gallery van de Universiteit Twente een KIVI-symposium gehouden waarin de diverse aspecten van nucleaire geneeskunde aan de orde kwamen. Er werd een overzicht gegeven van de ontwikkelingen vanuit de medische alsmede de fysische, politieke en financiële kant. Ook kwam er inzicht in de manier waarop er gewerkt wordt voor de volgende generaties medische radio-isotopen.**

➤ *Linker foto: student en mede organisator Nynke de Vries, rechter foto: Dr. Heleen Miedema introduceert Dr. Mark Konijnenberg*

betrekking tot diagnostiek en behandeling. Gammastraling uitzendende isotopen zijn altijd gebruikt voor diagnostiek en bèta-stralende isotopen voor behandeling. De alfa-stralende isotopen waren 'not done' vanwege hun specifieke energie en slechte detecteerbaarheid. In de huidige nucleaire geneeskunde zie je steeds meer een combinatie van diagnostiek en behandeling door specifieke isotopen die dat mogelijk maken. Ook wordt er gebruik gemaakt van specifieke eigenschappen van radioactiviteit. Zo is er een ontwikkeling om met positronen een deeltje in een tumor aan te stralen die bij verval annihilatiestraling uitzendt dat het Cherenkov-effect met zich meebrengt. Hiermee kunnen randen van een tumor zichtbaar gemaakt worden. Voorbeelden van isotopen die zowel diagnostisch als therapeutisch worden ingezet zijn jodium-133 en luthetium-177. Vooral laatstgenoemde wordt de laatste jaren voor steeds meer soorten tumoren gebruikt. Ook is er een voorzichtige

De zaal was vrijwel vol met een divers gezelschap van studenten van de UT, KIVI leden en (oud) werknemers van de diverse nucleaire bedrijven in Nederland. Er waren vier sprekers uitgenodigd: Vanuit de medische kant waren dit dr. Marcel Stokkel als voorzitter van de Nederlandse Vereniging voor Nucleaire Geneeskunde en werkzaam in het Antonie van Leeuwenhoek en dr. Mark Konijnenberg als klinisch-fysicus werkzaam op de afdeling Nuclear Medicine van het Erasmus MC. De technische kant werd verzorgd door dr. Ir. Ronald Schram,

directeur strategische allianties NRG en dr. Hermen van der Lugt, directeur PALLAS.

## **VERSCHUIVING NAAR COMBINATIE VAN DIAGNOSTIEK EN BEHANDELING**

De middag werd voorgezeten door dr. Heleen Miedema, directeur Health Opleidingen van de Universiteit Twente. Stokkel trapte af met een voordracht over de huidige stand van zaken en nieuwe ontwikkelingen rond diagnostiek en behandeling met radio-isotopen. Tot voor kort was er een duidelijk beleid met

verschuiving zichtbaar van bèta naar alfa-isotopen voor doelgerichte behandeling. Deze alfa-isotopen worden aan een drager gekoppeld die de isotoop naar de tumor brengt en van binnenuit schade aan de tumor toebrengt. Bij eerste studies is al gebleken dat alfatherapie het aantal behandelingen kan terugbrengen vanwege zijn krachtige en plaatsgebonden werking. Naast het bekende terrein van de oncologie en cardiologie waarin nucleaire geneeskunde al lange tijd bestaat zijn er ook ontwikkelingen in de neurologie voor bijvoorbeeld Alzheimer-diagnostiek.

**PREKLINISCHE EN KLINISCHE STUDIES**

Mark Konijnenberg ging in zijn voordracht nog een stukje dieper in op de diverse fases van onderzoek voordat een medicijn gebruikt kan worden. Zo kunnen de fases worden gesplitst in preklinische studies en klinische studies. In de preklinische studie wordt er getest met stukjes weefsel bv uit een weggehaalde tumor en in een later stadium met muizen. In de klinische fase wordt gebruik gemaakt van patiënten waarin de veiligheid van het medicijn wordt beoordeeld, daarna de effectiviteit en tot slot een vergelijking wordt gemaakt met reguliere behandelingen.

Zo zijn er recent studies geweest met Lutetium-177 voor prostaatanker welke

een verhoogde overlevingskans lieten zien ten opzichte van de reguliere methode. Een minder succesvolle studie was Radium-223 in combinatie met chemotherapie welke slechts een korte levensduurverlenging maar een hogere kans op bot-breuken gaf. Bij elk isotoop en elke tumor wordt bepaald hoe deze wordt toegediend en is de drager van de isotoop van belang. Een antilichaam is langzaam in de reis naar de tumor, maar effectief als deze er eenmaal is. Een peptide is snel maar hoopt zich soms ook op in andere delen van het lichaam welke niet behandeld hoeven te worden. Beide sprekers hebben enkele voorbeelden aangehaald, maar gaven aan dat er zoveel studies zijn dat zij gemakkelijk een week hadden kunnen vullen.

**VAN FUNDAMENTEEL ONDERZOEK NAAR PRODUCTIE MEDISCHE ISOTOPEN**

Vanuit de technische kant werd er een overzicht gegeven door Ronald Schram waarbij NRG zich steeds meer ging toelagen op de medische isotopen. Bij de bouw van de HFR, eind jaren 50, was het doel onderzoek naar kernenergie en materiaalonderzoek ten behoeve van kernreactoren. Met de bouw van de Molybdenum Productie Faciliteit in de jaren 90 is de focus langzaam richting de medische isotopen gegaan

en de laatste jaren ziet NRG daarin de toekomst door naast Mo-99 ook andere isotopen te ontwikkelen en te produceren. De ontwikkeling en productie vereisen een andere techniek en organisatie. De laatste ontwikkeling hierin is het initiatief Field-lab. In samenwerking met diverse bedrijven en medische centra wordt een laboratorium opgericht voor de productie van radio-isotopen voor klinische studies. Dit initiatief wordt mede gesubsidieerd vanuit Kansen voor West.

**FOCUS PALLAS OP MEDISCHE ISOTOPEN**

Als laatste kwam Hermen van der Lugt aan het woord met een update over de nieuwe onderzoeksreactor PALLAS die de HFR zal vervangen. Op dit moment zijn er wereldwijd zes reactoren beschikbaar voor de productie van medische isotopen waarvan er vier in Europa staan. Echter vanaf 2025 zal de productie sterk dalen vanwege de afschakeling van deze oude reactoren. Er werd een vergelijking met de HFR gemaakt.

	<b>PALLAS</b>	<b>HFR</b>
<b>Vermogen</b>	25 MW	50 MW
<b>Kern</b>	49 kg U	61 kg U
<b>Koeling</b>	passief	actief

In PALLAS zal de focus op de productie van medische isotopen komen te liggen, waarbij vooral de zwaardere isotopen in aanmerking komen voor productie in de reactor. De lichte isotopen kunnen vaak beter door een cyclotron worden geproduceerd. Komend jaar hoopt de organisatie de vergunning te kunnen aanvragen en het beoogde terrein te kunnen voorbereiden. De bouw zal tot 2025 duren waarna ontmanteling enige jaren zal duren. In die tijd zullen de HFR en PALLAS naast elkaar draaien. **K**

Jessica Bruin





## PRODUCTIE MOLYBDEEN MET VERSNELLER AANGEDREVEN URANIUMSPLIJTING

© Greg Anderson Photography



**De gebeurtenissen volgen zich in rap tempo op voor Shine Medical Technologies LLC, met de eerste paal in de grond voor de bouw in Janesville, Wisconsin (VS) tot haar eerste Medical Isotope Production Facility die naar verluidt in 2021 gebouwd zal zijn en in 2022 commercieel inbedrijf wordt genomen. Het op een versneller gebaseerd systeem is geschikt voor de grootschalige productie van alle uraniumspijting-isotopen waaronder het diagnostisch isotoop molybdeen-99.**

Onlangs diende SHINE een vergunningsaanvraag in bij de Amerikaanse toezichthouder NRC. “De aanvraag is ontvankelijk verklaard en NRC start nu de beoordeling”, zegt Harrie Buurlage SHINE vice president met European Operations in zijn portefeuille.

SHINE zal na oplevering acht op versnellertechniek gebaseerde systemen hebben staan die voor de productie van onder andere molybdeen-99 geschikt zullen zijn en aan meer dan een derde van de mondiale vraag naar dit meest gebruikte isotoop voor diagnostische doeleinden kan voldoen. Tijdens die ceremonie van het slaan van de eerste paal kondigde SHINE aan ook in Europa voet aan de grond te willen krijgen en op vier september kondigde SHINE de aanstelling van Harrie Buurlage aan als vice president, European operations. Buurlage, voormalig groepsdirecteur operaties van Mallinckrodt en ex-directeur operations bij NRG behartigt de belangen van SHINE’s activiteiten in Europa waaronder in eerste instantie het vaststellen van een locatie voor de Europese faciliteit voor de productie van medische isotopen. “Mijn opdracht is enorm duidelijk: maak in Europa mogelijk wat SHINE ook in de VS doet. Dus ik ben begonnen met de vraag: waar ga ik bouwen? Aan de hand van een longlist heb ik een aantal geschikte locaties vastgesteld waarbij belangrijke onderwerpen zijn of er voldoende kennis aanwezig is, of de infrastructuur geschikt is en of er een kernenergiewetvergunning verleend kan worden en die lijst is inmiddels teruggebracht van 20 naar 5 locaties.” Uiteindelijk is het de bedoeling dat Buurlage in het tweede kwartaal van 2020 aankondigt waar SHINE gaat bouwen. Een van de vijf locaties is de Onderzoeks Locatie Petten (OLP). Maar of SHINE daadwerkelijk gaat bouwen in Petten is natuurlijk nog maar de vraag en hangt af van de juiste condities.

## HISTORISCH AFVAL

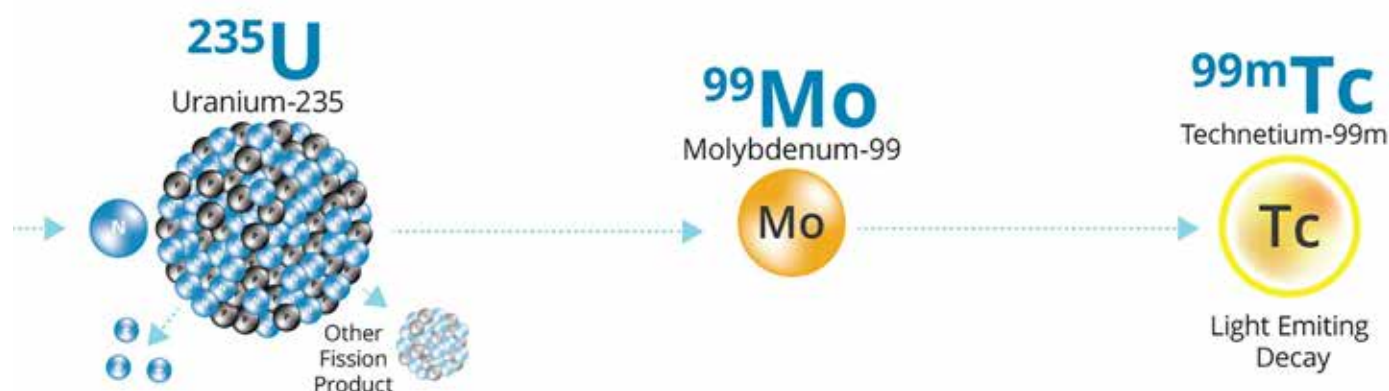
Eerder zei Buurlage in KernVisie dat Petten het kenniscentrum van nucleaire medicijnen in Europa moest worden. "Als de condities juist zijn, vind ik dat nog steeds en we zien ook heel duidelijk voordelen van Petten." Buurlage verwijst hiermee onder andere naar de grote Mo-generatorproducent Curium in Petten die een eigen molybdeenfabriek heeft. "Petten heeft veel nucleaire kennis en een omgeving die bekend is met de activiteiten op de OLP." Nadelen zijn er volgens Buurlage ook. "Is er wel voldoende ruimte op de

kwesties zoals het historisch afval. "Maar, verzekert Buurlage, "ook andere sites hebben hun voor- en nadelen." Naast Pallas en NRG is Buurlage in gesprek met Petten, met de gemeente Schagen, het ontwikkelingsbedrijf Noord-Holland-Noord, die hij allemaal meeneemt in dit proces, maar ook het ministerie van VWS en de toezichthouder ANVS. "Bij de ANVS waren ze op de hoogte van de SHINE-technologie en ik heb ze hier wat meer over kunnen vertellen en ben alvast vooruitgelopen op een mogelijk vergunningentraject mochten we in Nederland gaan werken."

transport en douane vertraagt, gaat 25 procent molybdeen als gevolg van de korte halfwaardetijd verloren. Bovendien wil SHINE voldoende wereldcapaciteit bouwen om zo veel mogelijk patiënten te kunnen helpen. Hier zijn meerdere faciliteiten voor nodig."

## ACHT VERSNELLERS IN EEN FABRIEK

Buurlage denkt trouwens niet dat het SHINE-systeem onderzoeksreactoren overbodig maakt. "Er zijn isotopen die effectiever gemaakt kunnen worden



© SHINE Medical Technologies

locatie?" Verder is SHINE een commercieel bedrijf dat bijna volledig zal steunen op private financiering. Inmiddels is reeds 350 miljoen dollar aan financiële ondersteuning geregeld, waaronder 40 miljoen dollar van de Amerikaanse overheid "Die private partijen willen in een gelijk speelveld zorgen dat de investering op een eerlijke manier met marges terugkomt. En we willen voldoende handelingsvrijheid om onze eigen bedrijfsvoering te kunnen voeren. SHINE wil haar operaties voeren onder een eigen kernenergiewetvergunning" Dat betekent dat er weliswaar een samenwerkingsverband tussen SHINE, NRG en Pallas kan zijn maar zonder inmenging in de bedrijfsvoering. Dat is nu nog niet opgelost. Ook wil SHINE geen last krijgen van aan de locatie verbonden

✎ Wanneer U-235 wordt beschoten door een neutron ontstaan splijtingsproducten waaronder molybdeen-99 en komen drie neutronen vrij. Het molybdeen vervalt tot technetium-99m.

In de VS is de vergunningsaanvraag ingediend bij de toezichthouder NRC en ontvankelijk verklaard. "De NRC start nu de beoordeling en het is wachten op de vergunningverlening." Buurlage benadrukt dat het niet gaat om de bouwvergunning, want die is reeds verleend, maar de vergunning voor exploitatie van de faciliteit. Hij hoopt over twee jaar de NRC-goedkeuring op zak te hebben zodat aansluitend in 2022 de eerste molybdeen beschikbaar komt voor de Amerikaanse én de Europese markt. Maar om de beperkingen van transport te minimaliseren wil SHINE ook in Europa een fabriek bouwen. "Elke 24 uur dat een batch door

met een neutronenflux die je in een kernreactor hebt. Je hebt neutronactivering en uraniumkernsplijting. Als je neutronactivering splitst heb je directe en indirecte activering. Bij directe activering heb je bijvoorbeeld lutetium-176 dat je bestraalt met een neutron tot lutetium-177. Bij indirecte activering kan je denken aan ytterbium-176 dat met een neutron ytterbium-177 wordt en vervolgens vervalt naar lutetium-177." Volgens Buurlage geniet een onderzoeksreactor de voorkeur voor directe activering. Hiermee ziet hij dan ook een mogelijke samenwerking tussen Pallas en SHINE wanneer de direct bestraalde isotopen voor verwerking ervan ✎

naar SHINE gaan. Daarnaast voorziet een SHINE-fabriek met acht versnellers in 30 procent van de behoefte aan molybdeen, ongeveer evenveel als nu de HFR produceert. "De vraag rijst dan wel of er nog een capaciteitsprobleem op termijn bestaat als SHINE naast uraniumsplijting ook een groot deel van de isotopen via indirecte bestraling kan voorzien."

### **OPTIMISTISCH**

De beoordeling van die vraag vereist een analyse van de huidige en toekomstige behoefte aan bestaande en nieuw te ontwikkelen medische isotopen. Volgens een rapport van het RIVM waarin wordt verwezen naar het onderzoek van de Europese Commissie naar de voorzieningszekerheid van medische radio-isotopen, luidt de conclusie dat het nodig is om nóg een reactor te bouwen om de EU zelfvoorzienend te laten blijven en tekorten op wereldschaal te voorkomen. Dit ondanks de initiatieven in Duitsland, Frankrijk en België om de bestaande productiecapaciteit voor medische radionucliden te vergroten. Pallas biedt de mogelijkheid om in de benodigde productiecapaciteit voor de komende decennia te voldoen. In een aanvulling

hierop wijst het RIVM ook op het SHINE-project. Maar het plaatst wel direct de kanttekening dat de berichtgeving over de productie van grote hoeveelheden molybdeen-99 in 2025 op de Europese markt 'mogelijk wat al te optimistisch' is. Ook verwacht het RIVM niet dat het met het SHINE-project mogelijk zal zijn binnen tientallen jaren het 'hele pallet aan reactor-geproduceerde medische radionucliden te maken'. "Het SHINE-project is daarmee geen complete vervanging van een reactor die medische radionucliden maakt", aldus het RIVM rapport.

### **EFFICIËNTER EN KOSTENEFFECTIEVER**

Een bijkomend voordeel van SHINE is volgens Buurlage dat er geen uraniumtargets nodig zijn omdat het uranium in een oplossing van 2 à 3 procent in het reactorvat is opgenomen. "Omdat het een gesloten loop-systeem is, dragen alle gespleten uraniumatomen bij aan de productie van radoisotopen, terwijl dat in de bestaande onderzoekreactoren om slechts enkele procenten gaat. Dit maakt het SHINE-proces efficiënter en kosteneffectiever. Daarnaast zorgt de technologie ervoor dat de afvalstroom

vele malen geringer is dan bij bestaande reactoren omdat het 'afval' zich al in oplossing bevindt." Het vat waarin de uraniumoplossing is opgenomen kan jaren worden bestraald waarbij wel het percentage uranium op peil wordt gehouden. Pas als na jaren de vervuiling in het vat te veel is toegenomen, wordt besloten het vat als radioactief afval af te voeren. "Maar ook dan is het nog mogelijk om de resterende één procent uranium eruit te halen." Buurlage zal niet ontkennen dat er geen afval vrijkomt, zoals er bij iedere uraniumsplijting splijtingsproducten en actiniden ontstaan, maar het is volgens hem beduidend minder dan wat een onderzoeksreactor produceert. Buurlage richt vooralsnog zijn pijlen vooral op de locatiekeuze voor bouw en exploitatie van een eerste SHINE-fabriek in Europa én de plaats waar het hoofdkantoor in Europa komt. Het kan daarbij best zo zijn dat de fabriek in een ander land komt dan het hoofdkwartier. In deze eerste fase gaat het ook om het aanstellen van een deskundig Europees team van ongeveer 150 mensen. "Als alles volgens plan verloopt zullen we al in de loop van volgend jaar weten waar het hoofdkantoor komt", besluit Buurlage. **K**

### **INHERENT VEILIG**

De technologie van SHINE is gebaseerd op de fusiereactie van deuterium en tritium waarbij door fusie een heliumkern ontstaat en er neutronen vrijkomen. Met behulp van deze neutronen wordt laagverrijkt uranium in een oplossing bestraald, waarbij na splijting onder andere molybdeen ontstaat. De fusiereactie is mogelijk door deuterium atomen met behulp van een magnetron van hun elektronen te ontdoen en ze als positief geladen deeltjes te versnellen. Ondanks het feit dat er fusie plaatsvindt, is de warmte die vrijkomt volgens Buurlage beperkt en de faciliteit kan eenvoudig worden gekoeld. "Het thermisch vermogen van een SHINE-opstelling genereert vijftigmaal minder warmte dan de HFR", aldus Buurlage. Hoewel er kernfusie en kernsplijting in een SHINE-opstelling plaatsvinden maakt Buurlage nadrukkelijk bezwaar tegen het gebruik van het woord reactor in een SHINE-opstelling. "Het woord reactor heeft de annotatie van een kernreactor en dat is in dit geval niet van toepassing op het versnellersysteem. We willen rekening houden met de perceptie. Mensen worden eenvoudig beïnvloed door bepaalde percepties die in onze beleving onvoldoende recht doen aan het significante onderscheid tussen een kernreactor en ons systeem", licht Buurlage toe. Anders dan in een kernreactor waar door splijting van uranium neutronen vrijkomen en een kettingreactie in stand wordt gehouden, stopt het splijten van uraniumatomen in een SHINE-opstelling als de versneller wordt uitgeschakeld omdat een kritische massa ontbreekt, ofwel de minimale hoeveelheid splijtbaar materiaal die nodig is om een nucleaire kettingreactie in stand te houden. Dat maakt het proces inherent veilig.



# ZONDER KERNENERGIE GAAT HET CO<sub>2</sub>-NIVEAU NIET (GENOEG) OMLAAG



Met de Nederlandse vertaling van *Climate Gamble* onder de titel *Kernenergie als Kans – Een uitdagende bijdrage aan het klimaat debat*, breken de Finnen Janne Korhonen en Rauli Partanen een lans voor het openbreken van het gepolariseerde klimaatdebat.

Dit wordt gekenmerkt door een onjuiste presentatie van onderzoeksresultaten en door wensdenken over technologische wonderen. De meeste boeken over kernenergie of radioactiviteit lijken vooral te zijn geschreven door overtuigde voorstanders, wetenschappers of fanatieke tegenstanders. Zo niet het boek *Kernenergie als Kans*. Het boek is het vol feiten en voetnoten geschreven resultaat van een zoektocht rondom het gepolariseerde klimaat- en energiedebat. Als bezorgde en kritische burgers gingen ze op onderzoek uit en stuitten op verrassende en soms ontluisterende waarheden. Kernenergie als *Kans* is een boek geschreven voor en door de bezorgde, kritische burger. De boodschap is glashelder. Klimaatverandering vormt een enorme bedreiging voor mens en milieu. De oorzaak ligt bij de verbranding van fossiele brandstoffen dus dat moet worden beëindigd. Met het oog op de groei van de wereldbevolking en de toename van het energiegebruik, moeten we alle CO<sub>2</sub>-emissievrije opties inzetten om een ramp te voorkomen, inclusief kernenergie.

## MILIEUACTIVISTEN WERKEN GEBRUIK FOSSIEL IN DE HAND

David Mackay, de schrijver van *Sustainable Energy – without the hot air* zet in het voorwoord de lezer meteen op scherp. Het ontbreekt ons aan woorden om de broodnodige nuance weer te geven, aldus Mackay. Maken we bij het verschijnsel licht onderscheid tussen felle zon (fel en schadelijk bij langdurige blootstelling) en maanlicht (zacht en onschadelijk), bij radioactiviteit wordt alles over één kam geschoren: levensgevaarlijk. In het boek komen alle grote onderwerpen kort maar krachtig aan de orde en is er ruimte voor nieuwe inzichten zoals Jevon's paradox. Deze stelt dat energie-efficiëntie niet automatisch leidt tot minder verbruik omdat mensen hun energie-efficiënte machines vaker in zullen zetten. Ronduit prikkelend is de stelling dat we met een klimaatprobleem zitten opgescheept omdat milieuactivisten de ontwikkeling van kernenergie jarenlang hebben tegengewerkt. Hierdoor konden de bedrijven met belangen in fossiele brandstoffen goed garen spinnen. NGO's verdedigen zich door te zeggen dat zij



ook niet voor fossiel zijn en windmolens en zonnepanelen willen; maar een antwoord voor een afdoende emissievrij back-up-systeem ontbreekt vooralsnog. Milieuorganisaties blijven onverminderd inzetten op een toekomst waarin onze energievoorziening alleen moet draaien op hernieuwbare energie en dat vinden de auteurs een gevaarlijke strategie. Het aandeel wind en zon dat met al zijn honderden miljarden aan investeringen in de afgelopen decennia is opgebouwd, dekt niet of nauwelijks de toename in mondiaal energiegebruik. Dat wetende, zou menigeen toch achter zijn of haar oren moeten krabben of wereldwijd wel de juiste richting maatregelen worden getroffen om de klimaatverandering tegen te gaan. De vlotte schrijfstijl en de gedegen onderbouwing maken het boek lezenswaardig voor iedereen die een mening wil vormen over het klimaatdebat en kernenergie, maar zich niet over de streep wil laten trekken door het voor- of tegenkamp. Lees en oordeel zelf. **K**

*Menno Jelgersma*

Titel: **Kernenergie als Kans** - Een uitdagende bijdrage aan het klimaatdebat  
Auteurs: **Rauli Partanen en Janne Korhonen**  
Vertaald uit het Engels door: **Gijs Zwartsenberg**  
Uitgeverij: **Nieuw Amsterdam**  
Prijs: paperback 17,99 euro,  
E-book 4,99 euro

## ► KERNVISIE SPECIAL

# GEN-IV KERNREACTOREN ESSENTIEEL VOOR TOEKOMSTIGE ENERGIEVOORZIENING



Het Generation IV International Forum (GIF) is een initiatief van het Amerikaanse ministerie van Energie uit 2000 en werd formeel medio 2001 op de agenda gezet. Het is een internationaal collectief waarin 13 landen participeren (waaronder ook de Europese Unie en al haar lidstaten), waar kernenergie nu een belangrijke bijdrage aan de energievoorziening levert, maar ook als essentieel voor de toekomst wordt gezien. Binnen het samenwerkingsverband zijn rond het jaar 2000 zo'n 130 reactorconcepten beoordeeld waarvan zes technologieën voor verder onderzoek en ontwikkeling zijn geselecteerd. Binnen Europa wordt gewerkt aan ontwikkeling van alle zes innovatieve systemen, waaronder reactorontwerpen als ALFRED, ALLEGRO, en MYRRHA. In Frankrijk is de ontwikkeling van de natriumgekoelde ASTRID-demonstratiereactor recentelijk stopgezet, al blijft Frankrijk de natriumtechnologie wel verder ontwikkelen.

Het basisdocument van het GIF is een kaderdocument voor de internationale samenwerking op het gebied van research en development (R&D) voor de volgende generatie kerncentrales zoals uiteengezet in het GIF Charter dat in 2001 werd ondertekend door

Argentinië, Brazilië, Canada, Frankrijk, Japan, Zuid-Korea, Zuid-Afrika, het VK en de VS. In 2002 sloot Zwitserland zich ook aan, het Euratom R&D-trainingsprogramma van de EU in 2003, China en Rusland in 2006 en Australië als veertiende lid in 2016.

Binnen het internationale samenwerkingsverband zijn een aantal nucleaire systemen naar voren gekomen die in staat worden geacht een bijdrage te leveren aan de toekomstige wereldwijde energiebehoefte. Gen IV-ontwerpen hebben als doel om splijtstof efficiënter te benutten, of minder afval te produceren, of economisch concurrerender te zijn, of meer passief veilige systemen toe te passen en/of te voldoen aan de stringente standaard voor proliferatiegevoeligheid. Ferry Roelofs, NRG-accountmanager research: "Het is een misvatting die ik maar al te vaak tegenkom, zelfs binnen de nucleaire wereld, dat elk Gen-IV-reactortype al deze doelen kan halen. Helaas is dat niet het geval." Met deze ijkpunten voor ogen zijn 130 reactorconcepten beoordeeld waarvan zes technologieën voor verder onderzoek en ontwikkeling in aanmerking komen: de gasgekoelde snelle reactor (GFR), de loodgekoelde snelle reactor (LFR), de gesmoltenzoutreactor (MSR), de superkritische watergekoelde reactor (SCWR), de natriumgekoelde snelle reactor (SFR) en de zeer hoge temperatuurreactor (VHTR).

#### DELEN VAN R&D

Binnen GIF gaat het vooral om het delen van R&D en niet zozeer om de daadwerkelijke nieuwbouw van de volgende generatie reactoren. Toch laten ontwikkelingen in de laatste jaren zien dat van sommige reactorontwerpen nieuwe demonstratiemodellen in de komende tien jaar te verwachten zijn, met commerciële toepassingen in 2030. Roelofs: "Laten we niet vergeten dat de allereerste reactor die ooit stroom leverde een SFR was, dat de eerste centrale in Europa een GCR (voorloper van de HTR) was, dat er al een 20-tal SFRs in de wereld in gebruik is (geweest). Zelfs een paar LFRs in Russische onderzeeërs, een 10-tal HTRs en een MSR. Alleen een GFR en een SCWR zijn nog nooit in bedrijf geweest." Ondertussen is China begonnen met de bouw van een prototype van de hogetemperatuurreactor (HTR-PM - High Temperature Reactor Pebble bed Modular) ofwel: de kogelbedreactor, die passief veilig is en wordt gekenmerkt door het gebruik van grafietballen van het formaat tennisbal waarin korreltjes uranium zijn opgenomen en een koelsysteem met helium. De ontwikkeling hiervan is de opmaat voor de ontwikkeling van de VHTR (Very High Temperature Reactor). Zowel India, China als Rusland ontwikkelen natriumgekoelde reactorontwerpen voor demonstratiedoeleinden in de nabije toekomst. Een prototype van een loodgekoelde snelle reactor kan mogelijk al voor 2030 in Rusland in gebruik worden genomen.

#### GESLOTEN SPLIJTSTOF CYCLUS

Een aantal van de zes systemen maakt gebruik van een gesloten splijtstofcyclus om zo veel mogelijk splijtstof te kunnen benutten of de hoeveelheid hoogradioactief afval te minimaliseren dat voor eindberging in aanmerking komt. Roelofs: "Een thorium

MSR en een Travelling Wave Reactor (TWR) (een speciaal type snelle reactor onder ontwikkeling bij het Amerikaanse bedrijf Terrapower) kunnen dat beide in een keer, alle andere kunnen dit niet tegelijkertijd en moeten een keuze maken. Een normale snelle reactor kan of uranium efficiënt gebruiken, of afval minimaliseren. Oplossing hiervoor is een park van dit soort reactoren te bouwen, waarbij bijvoorbeeld de ene snelle reactor splijtstof kweekt, terwijl de buurman snelle reactor het afval minimaliseert. Hiervoor moet de kern anders ingericht worden." Drie van de zes ontwerpen zijn snelle neutronenreactoren, één wordt beschreven als epithermal (waarbij de neutronen meer energie hebben dan in thermische reactoren). En slechts twee werken met langzame (thermische) neutronen zoals in hedendaagse PWR-reactoren. Slechts een van de ontwerpen wordt gekoeld met licht water, twee zijn heliumgekoeld en de andere lood(-bismuth), natrium- of gesmoltenzout-koelvloeistof. De laatste drie bij atmosferische druk, wat een aanzienlijk veiligheidsvoordeel oplevert.

#### HOGE TEMPERATUREN VOOR TOEPASSING IN PROCESWARMTE

Wanneer lood, natrium of gas als koelmiddel gebruikt wordt of de splijtstof is opgelost in zout als koelvloeistof kan de temperatuur variëren van 510 °C tot 800 °C of zelfs 1.000 °C, vergeleken met minder dan 330 °C voor de huidige lichtwaterreactoren. Dit betekent dat vier van de ontwerpen kunnen worden gebruikt voor thermochemische waterstofproductie of andere toepassingen die gebruik maken van hoge temperaturen. Roelofs plaatst daarbij een kanttekening: "Materialen vinden die deze temperaturen kunnen weerstaan en tegelijk de bestraling met neutronen aan kunnen, is echter een uitdaging."

#### OPBRAND

Het is belangrijk te benadrukken dat in het kader van de non-proliferatie, de snelle neutronenreactoren niet van het ontwerp van veel bestaande snelle kweekreactoren zijn, dat wil zeggen dat ze geen 'blanket' bezitten waar plutonium-239 wordt geproduceerd. In plaats daarvan vindt plutoniumproductie plaats in de kern, waar de 'opbrand' hoog is en de verhouding van andere dan Pu-239 plutoniumisotopen hoog blijft. Daarnaast zullen nieuwe opwerkingstechnieken worden ingezet die het mogelijk maken om de splijtstof te recyclen zonder het te scheiden van het plutonium. In januari 2014 volgde een nieuwe GIF Technology Roadmap update. Het bevestigde andermaal de keuze van de zes systemen en richtte zich op de meest relevante ontwikkelingen om de R&D-doelstellingen voor de komende tien jaar te definiëren. Het derde GIF-symposium vond in mei 2015 plaats in Japan en wordt beschouwd als bevestiging van de voortgang van de zes systemen in drie werkgroepen. **K**

# HET EUROPESE PROGRAMMA VAN 2010



**In Europa is in 2007 het Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) met daaronder het Europese Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) en het Nuclear Cogeneration Industrial Initiative (NC2I) gelanceerd.**

SNETP ondersteunt de ontwikkeling van de SCWR als doorontwikkeling van watergekoelde reactoren, de HTR (als onderdeel van NC2I), de drie Gen-IV snelle reactoren (ESNII), maar ook via een annex de MSR als onderdeel van het EU-plan om tot koolstofarme energietechnologieën te komen. ESNII is overigens niet van of door de EU. Het is een platform onder SNE-TP waarin alle Europese nucleaire R&D-stakeholders zijn verenigd. De EU volgt dit platform weliswaar nauwkeurig, maar wat er binnen SNE-TP en dus binnen ESNII besloten wordt, is niet per definitie de mening van de EU. Andere initiatieven binnen de koolstofarme plannen ondersteunen biomassa, wind, zon, elektriciteitsnetten en koolstofsequestratie, waarbij koolstof uit de atmosfeer wordt verwijderd door natuurlijke processen zoals de aanwas van bossen.

## EUROPESE GEN-IV REACTORONTWERPEN

Van de SCWR is de ontwikkeling van het Europese ontwerp zo'n 10 jaar geleden gestopt. Van de MSR bestaat geen breed gedragen Europees reactorontwerp, al wordt er meestal gerefereerd aan het Franse initiatief voor een snelle gesmoltenzoutreactor. Op het gebied van de HTR wordt er samengewerkt met de Amerikanen om te komen tot het ontwerp van een demonstratiereactor en locatie. Maar de meest concrete initiatieven ontplooiën zich in de sfeer van de snelle reactoren. Hierbij zijn de Europese initiatieven: de ASTRID, natriumgekoelde snelle reactor (SFR) van Frans ontwerp, de Allegro, gasgekoelde snelle reactor (GFR), ondersteund door Centraal- en Oost-Europa en de ALFRED, loodgekoelde reactor (LFR) technologie,

De Allegro GFR wordt met name ontwikkeld in Oost-Europa. Hij heeft een vermogen van 75 MWt en is jaren geleden ontwikkeld uit het EU GoFastR-project. De kern die eerst zal worden opgebouwd uit MOX wordt te zijner tijd vervangen door een kern van keramisch brandstof, maar het ontwerp is de laatste jaren uit beeld geraakt.

### ALFRED

ALFRED LFR-technologie demonstrator - de Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator - van ongeveer 300 MWt wordt gezien als een opmaat naar een industriële demonstratie-eenheid van ongeveer 300-400 MWe. ALFRED 'draait' op gemengd oxide (MOX), waar ongeveer 17% plutonium deel van uitmaakt, en moet in staat zijn om kleine actiniden te hergebruiken. De bouw van ALFRED kan in principe beginnen in 2020 waarmee de reactor in de tweede helft van de twintiger jaren in gebruik genomen zou kunnen worden. Een consortium werd opgericht in december 2013 voor de bouw van ALFRED, bestaande uit het Italiaanse Ansaldo Nucleare, het eveneens Italiaanse Nationaal Agentschap voor Nieuwe Technologieën, Energie en Milieu (ENEA), en het Roemeense Nuclear Research Institute (Institutul de Cercetari Nucleare, ICN). De groep is bekend als het Fostering Alfred Construction (Falcon) consortium, dat zal worden uitgebreid door de deelname van verdere Europese organisaties. De totale kosten van het project worden geraamd op circa €1,0 miljard. Het plan is om ALFRED te bouwen op de onderzoekslocatie van ICN in Mioveni, nabij Pitesti in het zuiden van Roemenië, waar een splijtstoffenfabriek is gevestigd voor de twee operationele Candu-reactoren van Roemenië.

### MYRRHA

Het Belgische Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) werkt actief aan het ontwerp en de bouw van een multifunctionele onderzoeksinstallatie in Mol. MYRRHA is een prototype van een kernreactor, aangedreven door een deeltjesversneller met een aanzienlijke thermisch output.

### EEN TOEKOMST MET MEER KERNENERGIE

Recent brak Jan Deschoolmeester, bio-ingenieur, kernlid Liberales en een van de initiatiefnemers van Ecomodernisme België op [www.knack.be](http://www.knack.be) een lans voor nucleaire technologische ontwikkeling: "We moeten het ecopessimisme ombuigen tot ecomodernisme. Kernenergie uitsluiten zou de strijd tegen klimaatverandering sterk bemoeilijken, zowel nu als in de toekomst, stelt ook het IPCC. We hebben atoomsplijting in zijn nieuwste technologische vormen opnieuw nodig. Durf daarom, net zoals ik en vele andere ecomodernisten, opnieuw te dromen van een toekomst met meer kernenergie." **K**

demonstratiereactor in ontwikkeling bij Italiaanse industrie in samenwerking met Roemenië waar de demonstratiereactor mogelijk gebouwd kan worden, ondersteund door de MYRRHA lood-bismuth reactor in Mol, België. Tot slot mag ook de loodgekoelde Zweedse SEALER-reactor niet vergeten worden, een klein reactorontwerp voor toepassing in het Verenigd Koninkrijk. Helaas maakte deze zomer Frankrijk echter bekend de ontwikkeling van hun natriumgekoelde Gen-IV-ASTRID-reactor op de lange baan te schuiven. Het opschorten van ASTRID mag dan een tegenslag voor de ontwikkeling van natriumgekoelde reactoren in Europa zijn, maar dit opent tevens paden voor de andere reactorontwerpen. Wellicht kunnen de TU Delft en NRG zich met onderzoek aan dat soort ontwerpen goed profileren.



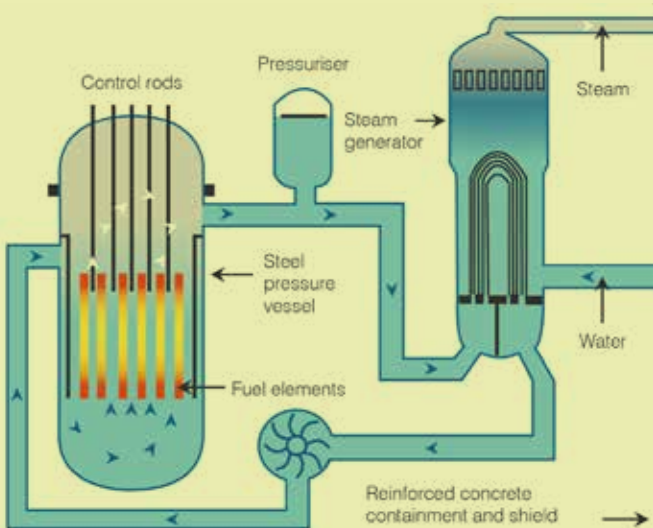
# GEAVANCEERDE REACTORONTWERPEN: EEN OVERZICHT



**PWRs, BWRs, SMRs en MSRs. Dit zijn nog maar vier van een reeks acroniemen die op reactortypen betrekking hebben. Om een bescheiden licht te laten schijnen op de acroniemenverzameling volgt hier een overzicht.**

Het meest voorkomende reactortype is de PWR (Pressurized Water Reactor) ofwel de drukwaterreactor. Ook de kerncentrales in Borssele en Doel zijn van dit type. De PWR is een watergekoelde reactor met een werkdruk van ongeveer 150 atmosfeer. Om een zo hoog mogelijke temperatuur van het koelwater te krijgen wordt de kern in een afgesloten systeem onder druk gehouden en wordt de koelvloeistof rondgepompt. Via een grote warmtewisselaar (een stoomgenerator) wordt de warmte van het koelwater uit het eerste circuit overgedragen aan water in een tweede circuit. Dit zorgt er enerzijds voor dat het water uit het primaire circuit zijn warmte verliest en het water in het tweede circuit gaat koken waarna de stoom een turbine aandrijft voor de opwekking van stroom. De gesloten kerncentrale bij Dodewaard was van het type BWR (Boiling Water Reactor) ofwel een kokendwaterreactor. Bij dit type reactor is geen warmtewisselaar nodig omdat het water in de reactorkern tot koken wordt gebracht en direct een turbine aandrijft. Zowel een PWR als een BWR behoren tot de Licht Water Reactoren (LWR). Bij drukwaterreactoren, zoals alle thermische reactorontwerpen, moeten de snelle neutronen

die bij de splitsing vrijkomen geremd worden (het modereren van neutronen) om een nieuwe splijting met een uraniumatoom mogelijk te maken en zo de kettingreactie in stand te houden. In een PWR is het koelwater de moderator doordat de neutronen meerdere botsingen met lichte waterstofatomen in het water ondergaan en daardoor snelheid verliezen. Het gebruik van water als moderator is een belangrijke veiligheidsvoorziening van een LWR want door temperatuurverhoging zet het water uit, waardoor meer 'gaten' tussen watermoleculen ontstaan en er dus minder neutronen worden gemodereerd en de reactiviteit van de reactor afneemt. Daarom, als de reactiviteit toeneemt tot boven normaal, zal de kettingreactie afnemen omdat er minder afgeremde neutronen zijn en er dus minder warmte wordt geproduceerd. Deze eigenschap staat bekend als de negatieve temperatuurcoëfficiënt van reactiviteit en het maakt LWR-reactoren zeer stabiel. Deze werkwijze wordt aangeduid als 'zelfregulerend', dat wil zeggen hoe heter de koelvloeistof, hoe minder reactief de reactor. Zowel de PWR (Borssele) als de BWR (Dodewaard) zijn Generatie II-reactoren.

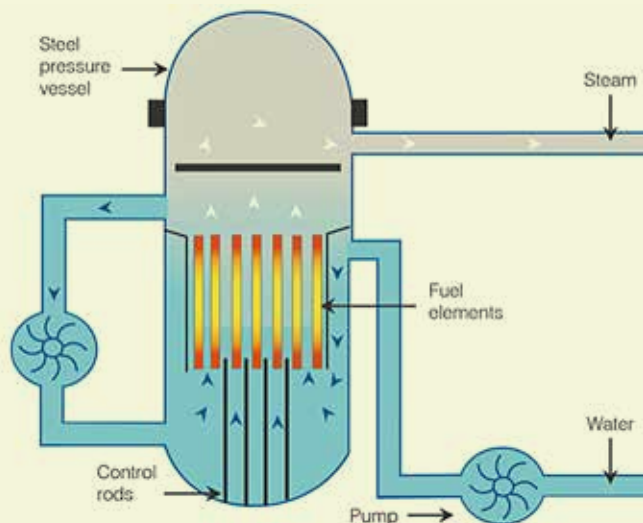


## **PWR (PRESSURIZED WATER REACTOR) HOGEDRUK WATERREACTOR**

Vele ontwerpen van dit type reactoren zijn in ontwikkeling of worden op dit moment gebouwd, zoals de EPR in Finland en Frankrijk of de AP1000 van Westinghouse en de Russische VVER-1000 en VVER-1200. Binnen dit segment van PWRs vallen ook de APR1400 uit Korea, CAREM uit Argentinië en de KLT-40S uit Rusland waarvan er twee op de Akademik Lomonosov zijn geïnstalleerd, de drijvende kerncentrale die noordoost Rusland van stroom moet gaan voorzien. Het zijn dus niet alleen de grote reactoren maar ook zoals de CAREM en de KLT-40S, kleine reactoren met respectievelijk 25 en 70 MWe vermogen of de Braziliaanse Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) in ontwerp, een modulaire reactor van 70 MWe.

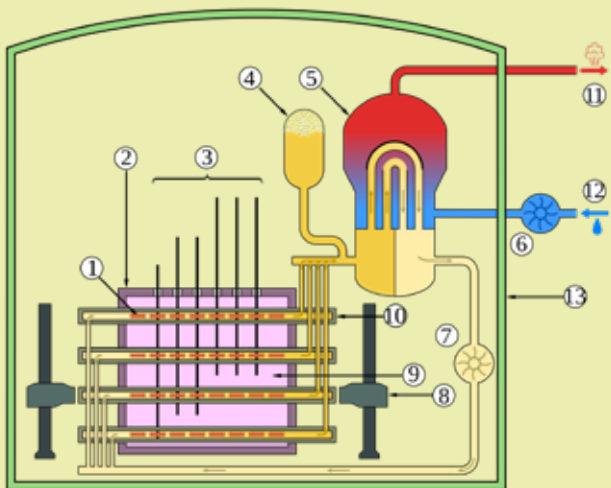
**BWR (BOILING WATER REACTOR)**  
KOKENDWATERREACTOR

Van dit type reactoren vallen er op dit moment vijf onder het kopje geavanceerd, waarvan er drie nog op de tekentafel liggen. Voor één is een licentie aangevraagd en één is al commercieel inzetbaar: Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) van het Japanse bedrijf GE-Hitachi. Hitachi was al begonnen met de bouw van een ABWR op de Wylfa Newydd site in Groot-Brittannië, maar begin dit jaar maakte het bedrijf bekend het werk in Wylfa en Oldbury voor onbepaalde tijd uit te stellen omdat het niet tot overeenstemming kon komen over de financiering.



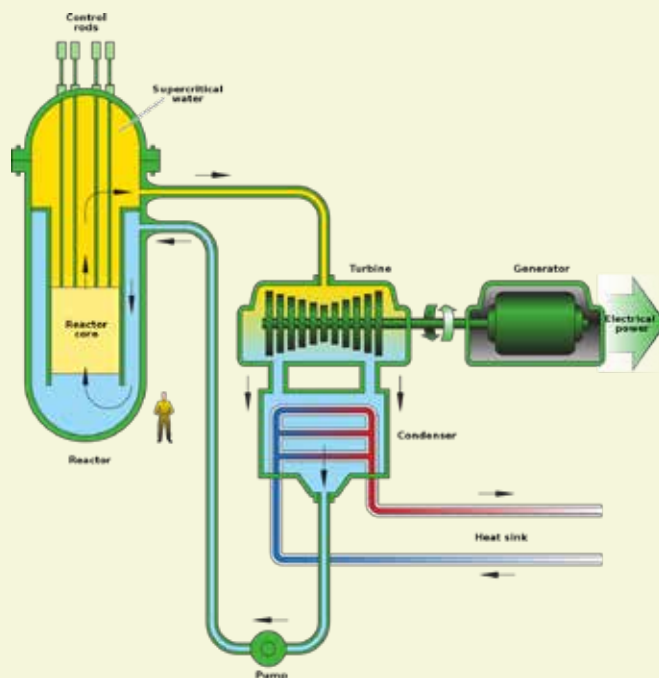
**HWR (HEAVY WATER REACTOR)**  
ZWAARWATERREACTOR

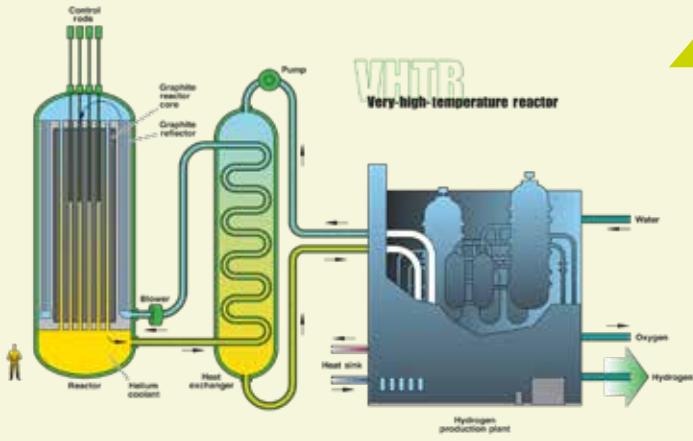
Met Canada als de bakermat van de Candu-zwaarwaterreactor is het niet verrassend dat het Canadese SNC-Lavalin zich richt op twee nieuwe ontwerpen: de Enhanced Candu ó en de Advanced Candu Reactor 1000 (ACR-1000). Maar ook India heeft de zwaarwatertechniek omarmd. Met één ontwerp - Advanced Heavy Water Reactor - op de tekentafel, één - Indian 700 MWe PHWR (IPHWR-700) - in aanbouw en één - Indian 220 MWe PHWR (IPHWR-220) - in bedrijf toont het land een vooruitstrevende positie op het gebied van nucleaire technologie in te nemen.



**SCWR (SUPER CRITICAL WATER REACTOR)**  
SUPERKRITISCHE WATERREACTOR

Van dit type reactor dat onderdeel uitmaakt van de Gen-IV roadmap is een beperkt aantal ontwerpen in ontwikkeling in China, Japan, Canada en in het recente verleden ook in de EU (ook NRG en de TU Delft waren hierbij betrokken). In feite draait het bij de SCWR om ultieme doorontwikkeling van LWRs met als uitgangspunt het economischer maken van de reactor. Al deze ontwerpen zijn bedoeld als demonstratiemodellen. De reactoren zijn bedoeld voor stroomproductie met superkritisch water als moderator en koelmiddel.



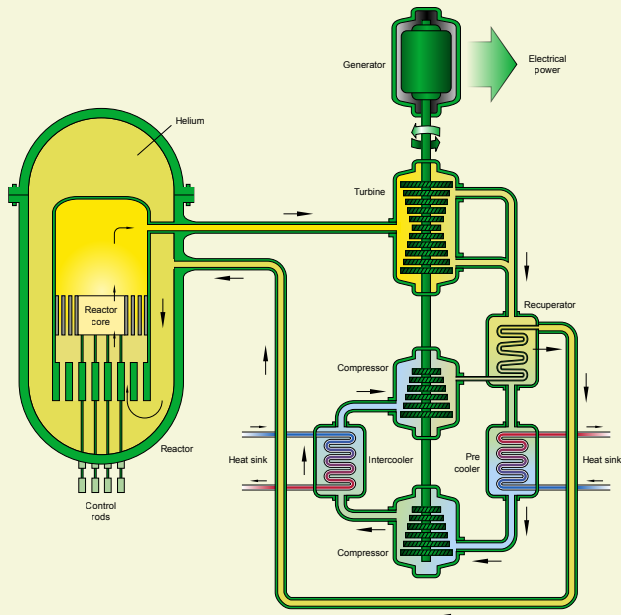


**HTR** (HIGH TEMPERATURE REACTOR)  
HOGE TEMPERATUUR REACTOR

Van dit type reactor is wereldwijd een groot aantal in ontwikkeling. Grotweg zijn ze in te delen in twee soorten. Allereerst de kogelbedreactoren en daarnaast de prismatisch-blok reactoren. Beide soorten worden gekenmerkt door het gebruik van helium als koelmiddel en uraniumsplijstof in de vorm van korreltjes die in een grafietmatrix worden geplaatst. Dat kan in de vorm van grafietballen van het formaat tennisbal (zoals in kogelbedreactoren) of in de vorm van zeshoekige blokken met koelkanalen erin. Mits goed ontworpen, hebben testen aangetoond dat de splijstof nooit zo warm wordt dat die gaat smelten. Dat maakt dat dit systeem vaak gezien wordt als een systeem met een grote mate van passieve veiligheid (van nature ingebouwde veiligheid waarbij geen menselijk handelen nodig is).

**FR** (FAST REACTOR)  
SNELLE KWEEKREACTOR

De ontwerpen binnen deze groep worden over het algemeen uitgesplitst naar koelmiddel. Er zijn vele ontwerpen in ontwikkeling variërend van zeer groot tot heel klein.



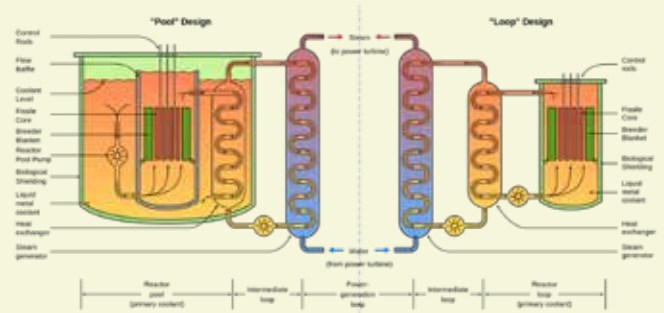
**GFR** (GAS-COOLED FAST REACTOR)  
GASGEKOELDE SNELLE REACTOR

Binnen dit segment vallen niet heel veel ontwerpen. Het bekendst zijn de Europese ALLEGRO en de Amerikaanse EM2 van General Electric. Is het eerste ontwerp bedoeld als demonstratiemodel, de EM2 moet commercieel worden ingezet. Dit ontwerp wordt gekoeld met helium en draait op verbruikte splijstof die niet eerst hoeft te worden opgewerkt en op die manier een deel van het kernafval van conventionele centrales als splijstof kan verwerken.



**LMFR (LIQUID METAL COOLED FAST REACTOR)**  
**METAALGEOELENDE SNELLE REACTOR**

De meeste snelle reactoren of reactorontwerpen gebruiken een vloeibaar metaal als koelmiddel. Meestal is dat natrium, puur lood of een loodlegering. Dit type reactoren wordt dan ook wel verder uitgesplitst naar deze koelmiddelen.

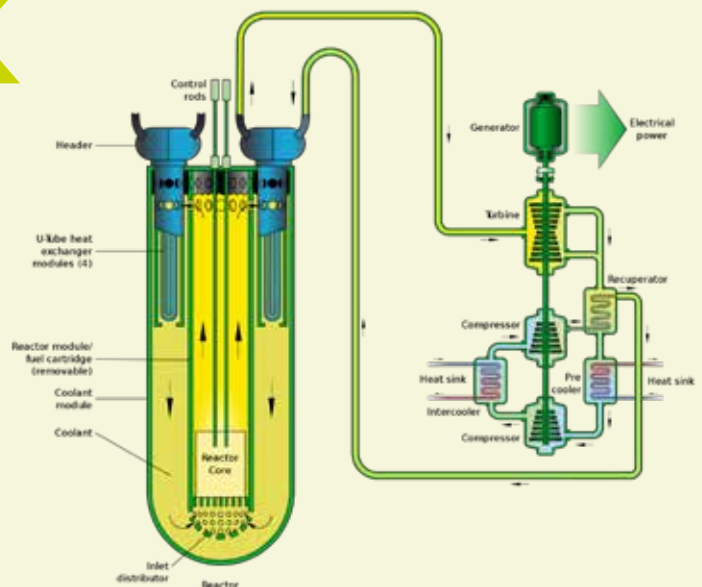


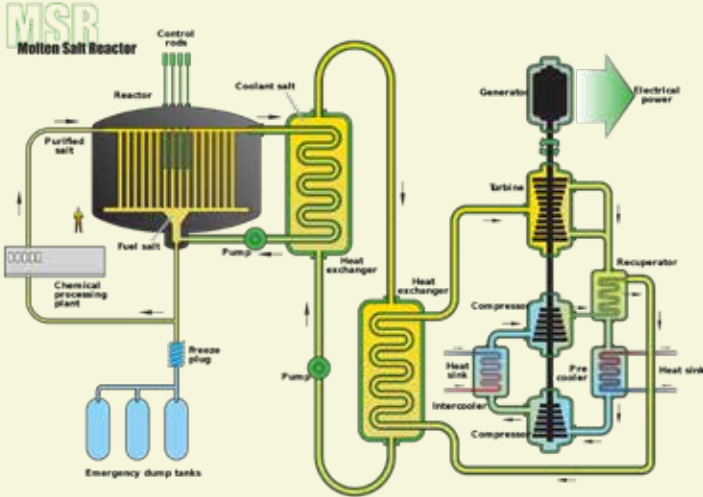
**SFR (SODIUM-COOLED FAST REACTOR)**  
**NATRIUMGEOELENDE SNELLE REACTOR**

Hiervan is een heel aantal ontwerpen in ontwikkeling. Binnen de EU was alleen Frankrijk met ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) direct betrokken bij de ontwikkeling van dit type natriumgekoelde snelle reactoren. Veel andere landen echter dragen in de onderzoeksfase hun steentje bij. Onlangs echter heeft Frankrijk de ontwikkeling van de reactor gestopt, alhoewel Frankrijk wel onderzoek blijft doen naar de technologie van natriumgekoelde reactoren. Dit type reactor wordt momenteel commercieel toegepast in Rusland. Daar is de BN-600 al sinds 1980 in gebruik en is de BN-800 een paar jaar geleden in gebruik genomen. Ook in China en India staan demonstratiereactoren van dit type en wordt hard gewerkt aan een commerciële opvolger. De PFBR in India is reeds in een de afrondende fase van constructie en men is bezig met de ingebruikname-testen. Ook het Amerikaanse TWR-P-ontwerp van Terrapower behoort tot deze groep reactoren.

**LFR (LEAD-COOLED FAST REACTOR)**  
**LOODGEOELENDE SNELLE REACTOR**

Een loodgekoelde reactor is een kweekreactor waarbij gesmolten lood of een combinatie van lood en bismut dient als koelstof. Die combinatie is eutectisch wat betekent dat het smeltpunt lager is dan van de metalen zelf. Van de bekende ontwerpen zijn er een paar bij die al min of meer naam hebben gemaakt, zoals: de puur loodgekoelde Europese ALFRED, maar vooral toch de experimentele MYRRHA reactor die in België wordt ontwikkeld bij het Belgische Nucleaire Onderzoekscentrum SCK•CEN. Ook hier zijn ontwerpen die uiteindelijk commercieel ingezet moeten worden zoals de lood-bismut gekoelde modulaire Russische SVBR en de loodgekoelde BREST, maar daarnaast de Zweedse SEALER bedoeld voor inzet in afgelegen arctische gebieden of voor stroomvoorziening voor de Engelse markt. ➤





**MSR (MOLTEN SALT REACTOR)**  
**GESMOLTENZOUTREACTOR**

Deze groep kent inmiddels behoorlijk wat bekendheid omdat dit type reactoren, dat gesmolten zout gebruikt als koelmiddel waarin een splijtstofmengsel is opgenomen, bij uitstek geschikt is om ingezet te worden als thoriumreactoren. Bovendien levert de combinatie koelmiddel en splijtstof voordelen op ten aanzien van veiligheid. Net als de natrium- en loodgekoelde reactoren leveren ze door hun hoge werktemperatuur ook hoge rendementen en werken ze onder atmosferische druk. Bekende namen in deze groep zijn onder andere: de LFTR van Flibe Energy, de IMSR-400 van Terrestrial Energy en de Thorcon van Martingale. Er is nog een tweede soort van dit type reactor, namelijk de gesmolten-zout gekoelde reactor, waarbij de splijtstof niet is opgelost in het koelmiddel maar net als bij een HTR gevangen zit in een grafietmatrix in de vorm van ballen of in de vorm van zeskantige blokken. Kairos Power in Amerika is een voorbeeld van een bedrijf dat zo'n type reactor ontwerpt.

**SMR (SMALL MODULAR REACTOR)**  
**KLEINE MODULAIRE REACTOR**

De leden van deze groep worden kenmerkt door het formaat en modulaire karakter en niet zozeer door de overeenkomstige (koelmiddel)technologie. De reactorontwerpen zijn dan daarom ook in bovenstaande groepen te vinden. SMRs worden gekenmerkt als reactoren met een vermogen van 300 MWe of minder en de modulaire technologie maakt het mogelijk reactoren te schakelen tot grotere eenheden en/of modulaire technologie te gebruiken voor de fabricage waardoor, onder geconditioneerde omstandigheden, een kortere bouwtijd mogelijk is en geringere bouwkosten. Verschillende ontwerpen worden op dit moment gebouwd: de HTR-PM, een demonstratie-kogelbedreactor uit China, de KLT-40S, een PWR uit Rusland met een beoogd vermogen van 70 MWe, en CAREM, een 25 MWe iPWR (zie volgende paragraaf) in Argentinië. Maar in principe behoorde ook de nu gesloten centrale in Dodewaard tot deze categorie reactoren.



Bij de iPWR (integral pressurized water reactor) gaat het om SMRs met ontwerpen van onder meer NuScale (VS), Kaeri (Korea), CNEA (Argentinië) en Mitsubishi (Japan). De 100MWe SMART van Kaeri heeft in 2012 een ontwerpgoedkeuring ontvangen. Voor de verdere ontwikkeling is een samenwerkingsverband gestart met Saudi-Arabië. Onderdeel van de samenwerking is de intentie om twee SMARTs in Saudi-Arabië te bouwen en gezamenlijk de verkoop van het ontwerp, met name voor de derde wereld, mogelijk te maken. Het betreft een flinke hoeveelheid ontwerpen die de IAEA al eens in een booklet heeft verzameld (<https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>). **K**



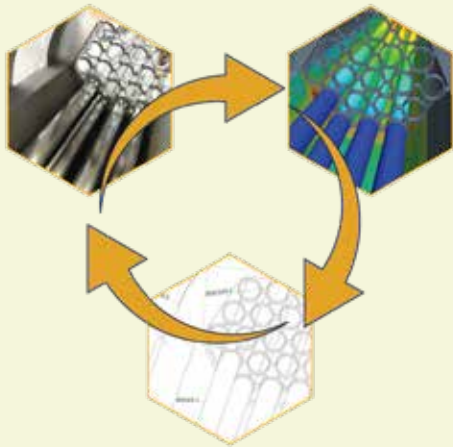
# MODELLERING EN SIMULATIE ESSENTIEEL BIJ ONTWERPONDERSTEUNING EN VEILIGHEIDSANALYSE



**NRG is wereldspeler op gebied van thermo-hydraulische analyses voor verscheidene reactoren, van hedendaagse watergekoelde reactoren tot Gen-IV gas, gesmolten zout en metaalgekoelde reactoren. Vooral met simulaties op detailniveau weet NRG de brug te slaan naar toepassing in de praktijk wat er volgens Ferry Roelofs, programmacoördinator modellering en simulatie bij NRG, toe leidt dat je een machine leert kennen voor je hem gaat bouwen: "Validatie is essentieel voor ontwerpondersteuning maar ook voor veiligheidsanalyses die nodig zijn in het vergunningetraject."**

Een machine kennen voor je hem bouwt klinkt logisch en dat is het misschien ook, maar in het verleden waren de mogelijkheden voor deze stap beperkt, omdat de rekenkracht die ontwerpers nu hebben destijds ontbrak. Met geavanceerde rekenmethodieken dankzij steeds krachtigere computers is het nu wel mogelijk om simulaties op meerdere detailniveaus uit te voeren. Roelofs: "Een

reactorontwerp of het ontwerp van een experiment begint met een idee over de machine of het experiment dat je zou willen bouwen. Zo'n idee wordt eerst omgezet in ontwerptekeningen. Deze komen bij de modelleerder terecht met de vraag voor ontwerpondersteuning of veiligheidsanalyses." In het geval van ontwerpondersteuning aan experimentele opstellingen legt ►



➤ De interactie tussen ontwerp, experiment en simulatie. Simulaties helpen om een experiment te ontwerpen. Met het definitief ontwerp wordt het experiment gebouwd. En uiteindelijk helpen de simulaties het experiment beter te begrijpen terwijl tegelijkertijd het experiment dient als validatie van de simulatiemethodiek (figuur gebaseerd op het boek 'Thermal Hydraulics Aspects of Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors').

Roelofs uit dat het kan zijn dat uit de berekeningen volgt dat het raadzaam is om op een specifieke locatie in het model een meetpunt te maken. "Dat kan het resultaat zijn van berekeningen die een hotspot laten zien, terwijl je dat zelf in het voortraject helemaal niet had bedacht." De ontwerper kan dan in aansluiting hierop kijken of het mogelijk is, of er bijvoorbeeld überhaupt ruimte is voor een extra meetpunt.

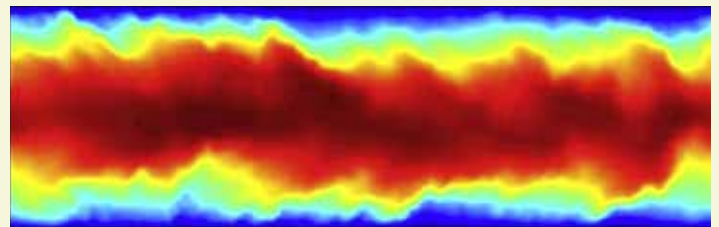
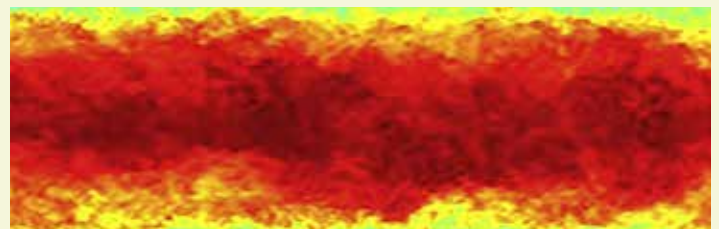
## WATER EN VLOEIBAAR METAAL

Wanneer berekeningen en ontwerp op een lijn uitkomen kan een experiment gebouwd worden. "Tijdens die bouw kom je natuurlijk van alles tegen. Bijvoorbeeld terwijl het ontwerp uitgaat van een buis met een diameter van 8 millimeter, blijkt die in de praktijk 9 millimeter te zijn hetgeen betekent dat de berekeningen wellicht anders uitpakken en er weer opnieuw gerekend moet worden. Het is het belang voor de experimentalist aan de ene kant en de rekenaar aan de andere om tot een geslaagd experiment te komen. Ze kunnen niet zonder elkaar." Sommige mensen denken dat een numerieke simulatie niet zonder experiment kan maar een experiment kan wel zonder simulatie. "Wat wij steeds vaker zien, is dat dit niet juist is." Als voorbeeld noemt Roelofs het werken aan metaalgekoelde reactoren. "In een vloeibaar metaal kunnen we wel temperaturen meten, maar om een accurate indruk te krijgen van het snelheidsveld, moet er nog een meetmethode ontwikkeld worden. In zo'n geval kan de wisselwerking met simulatietechnieken uitkomst bieden." In water is het mogelijk om een video-opname te maken en met gebruikmaking van tracerdeeltjes te zien hoe het water stroomt; bij een vloeibaar metaal kan dat niet. "Dat vereist dus geavanceerde technieken

zoals ultrasone metingen met geluid om als het ware te 'kijken' hoe de stromingen verlopen, maar die technieken zijn nog lang niet zo ver ontwikkeld als de technieken die we kunnen gebruiken in water." Er is daarnaast een fundamenteel verschil tussen water en vloeibaar metaal als het gaat om warmtegeleiding. "Denk maar aan het opwarmen van een pannetje water. Dat neemt enige tijd in beslag. Metaal opwarmen gaat vanwege de geleiding veel sneller. Je kunt dus niet de rekenmodellen een-op-een van water of lucht op metaal overzetten."

## FIJN REKENROOSTER

In zulke gevallen kiezen Roelofs en zijn collega's nu soms voor het uitvoeren van "numerieke experimenten" waarbij ze bijvoorbeeld voor turbulentie uitgaan van de natuurkundige wetten zonder modelaannames te doen. "Dat kunnen we doen omdat we uitgaan van een relatief simpel en klein domein. Dat lijkt weliswaar helemaal niet op een echte reactor, maar het stelt ons wel in staat de vereiste data voor validatie te genereren." Om zo nauwkeurig mogelijk te zijn wordt er gewerkt met een heel fijn rekenrooster. "We hebben aan vloeibaar metaal gerekend en dat levert resultaten op die je nooit uit een fysiek experiment kunt halen; zo gedetailleerd kun je nooit in een experiment meten. Wij kunnen bijvoorbeeld snelheden zichtbaar maken die we op dit moment nog niet in metalen kunnen meten. Ondanks dat we op de natuurkundige wetten kunnen vertrouwen, proberen we het vertrouwen in dit soort 'numerieke experimenten' te vergroten door berekeningen voor water te vergelijken met data van experimenten uitgevoerd in water. Dat is niet ideaal maar we hebben geen andere keuze." Gelukkig zijn er nieuwe technieken in ontwikkeling

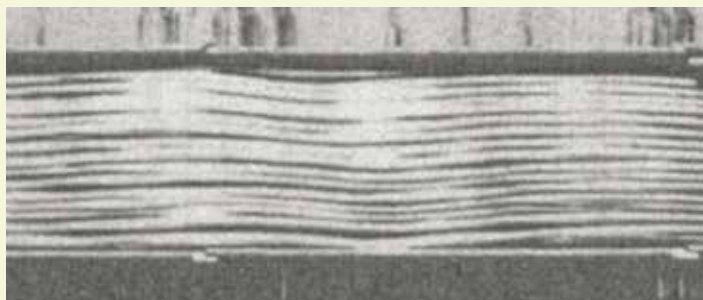


➤ Turbulente warmtestructuren voor de stroming tussen twee horizontale koelplaten voor lucht (boven) en een vloeibaar metaal (onder); rood is heet, blauw is koud. In het geval van vloeibaar metaal dringt de koeling dieper door in de stroming door de goede warmtegeleiding van het metaal (uit Duponcheel et al., 2014).

die wel in staat zijn om stroomsnelheden in metalen te meten. Die geven volgens Roelofs aan dat de snelheidsvelden in water en vloeibaar metaal op dezelfde manier berekend kunnen worden.

Het belang is om precies te weten wat de stroomsnelheden van vloeibaar metaal in een reactor zijn, ligt volgens Roelofs in veiligheidsanalyses die limieten aan de temperatuur aangeven. "Water mag geen stoom worden en natrium of lood mag niet verdampen of materialen waarmee het in aanraking komt aantasten. En een lokale temperatuur hangt dikwijls samen met het lokale snelheidsveld." Maar ook rekenprogramma's maken fouten. "Dat is op zich geen probleem zolang je rekenresultaten maar conservatief zijn of zolang je de nauwkeurigheid van je berekeningen goed kent zodat je een veiligheidsfactor kunt bepalen."

Een voorbeeld waarbij de warmte in het geding is, zit bij de splijstofelementen van metaalgekoelde reactoren. Een ontwerper of veiligheidsanalist wil hierover een aantal dingen weten. Roelofs: "Hoe ziet het warmteprofiel er in een element uit onder normale bedrijfscondities? Zijn er hotspots? Maar ook: Blijft het splijstofelement zoals het op de ontwerptafel is getekend of ontstaan er vervormingen. En als dat zo is, wat is daarvan dan de invloed op het snelheids- en temperatuurprofiel? Bij een loodgekoelde reactor stroomt vloeibaar lood van honderden graden Celsius door het systeem. "Om ervoor te zorgen dat de splijstofstaven niet tegen elkaar aankomen wordt er een metalen draad rond de staven gedraaid. Er ontstaan dan spanningen en de staven gaan vervormen. Dat weten we omdat dat in bestaande reactoren zoals de natrium-gekoelde FFTF reactor (Fast Flux test Facility) in de Verenigde Staten is aangetoond (zie figuur). De volgende stap is: hoe kunnen we voorspellen hoe die vervormingen eruitzien en wat is de consequentie voor het warmtetransport. Ook kan een pin worden aangetast door chemische reacties en wat betekent dat voor het warmtetransport. Daar weten we nog heel weinig van."



➤ *Vervormingen in een splijstofelement van de Amerikaanse natriumgekoelde FFTF reactor (uit Bridges et al., 1991)*

## ANDERE METAALGEOELDE REACTOREN

De Europese loodgekoelde Alfred (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator) en de Zweedse loodgekoelde Sealer (Swedish Advanced Lead Reactor) zijn wel in ontwikkeling maar worden op dit moment nog niet gebouwd. In Rusland, China en India zijn wel natriumgekoelde reactoren in bedrijf. "We weten dat de Russische reactor BN-600 al jaren succesvol draait (nadat zoals te verwachten is in de eerste jaren een aantal kleinere praktische problemen opgelost moest worden) en dat zal voor de nieuwe BN-800 reactor waarschijnlijk ook zo zijn. Tegelijkertijd zijn de Russen bezig met het ontwerp van de BN-1200 die qua grootte overeenkomt met de Franse Superphénix-reactor die enkele jaren in bedrijf is geweest maar onder publieke en politieke druk is stilgezet." Het delen van kennis over de ontwikkeling van deze Gen-IV-technologie verloopt moeizaam volgens Roelofs. "Er is wel enige uitwisseling via de IAEA, maar heel veel blijft natuurlijk gevoelig uit concurrentieoverwegingen." Opmerkelijk blijft het natuurlijk dat Roelofs onderzoek doet naar metaalgekoelde reactoren terwijl in Rusland en China dergelijke reactoren in bedrijf zijn. "Dat klopt, ook in Europa zijn in het verleden dit soort reactoren in bedrijf geweest. Ik weet wel dat op mijn vakgebied de internationale reactorontwerpers onze ontwikkelingen goed in de gaten houden. We weten bijvoorbeeld dat de Russen die werken aan de Brest OD-300 loodgekoelde reactor, de Chinezen die werken aan de loodgekoelde CLEAR reactor, en de Amerikanen van Terrapower die werken aan een innovatieve natriumgekoelde reactor geïnteresseerd zijn in onze publicaties in de open literatuur." Toch blijft uitwisseling van kennis een lastig onderwerp. "Wetenschappelijk gezien zou je natuurlijk het liefste samenwerken, maar dat ligt allemaal erg gevoelig zowel qua concurrentiepositie, als vanuit security overwegingen. Dat begrijp ik maar al te goed. Toch blijft het jammer dat je de afzonderlijke kennis niet altijd kunt bundelen en soms dus het wiel opnieuw aan het uitvinden bent. Rusland heeft bijvoorbeeld als enige land ter wereld ervaring met het bedrijven van loodgekoelde reactoren. Uitwisseling van hun praktijkervaring zou zeer welkom zijn maar vindt slechts op beperkte schaal plaats."

## COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Het CFD-vakgebied is nog jong. CFD is niet gebruikt bij de ontwikkeling van bijvoorbeeld Gen-II-reactoren. "Dus toen nam je extra veiligheidsmarges mee in berekeningen; nu kun je veel preciezer uitrekenen wat er in een systeem gebeurt." Rekenkracht gaat enorm vooruit. "Wat heb je nodig om een koelkanaal door te rekenen, een compleet splijstofelement of een complete reactor. Hoe zit het daarbij met het 'grid' of rekenrooster aan rekencellen." In elk klein rekencelletje weten we wat er gebeurt; wat erin gaat en wat eruit komt. Hoe meer cellen hoe nauwkeuriger de uitkomst. Voor een grove doorrekening van een koelkanaal (sub channel) heb je ongeveer tienduizend cellen nodig, tienduizend ➤

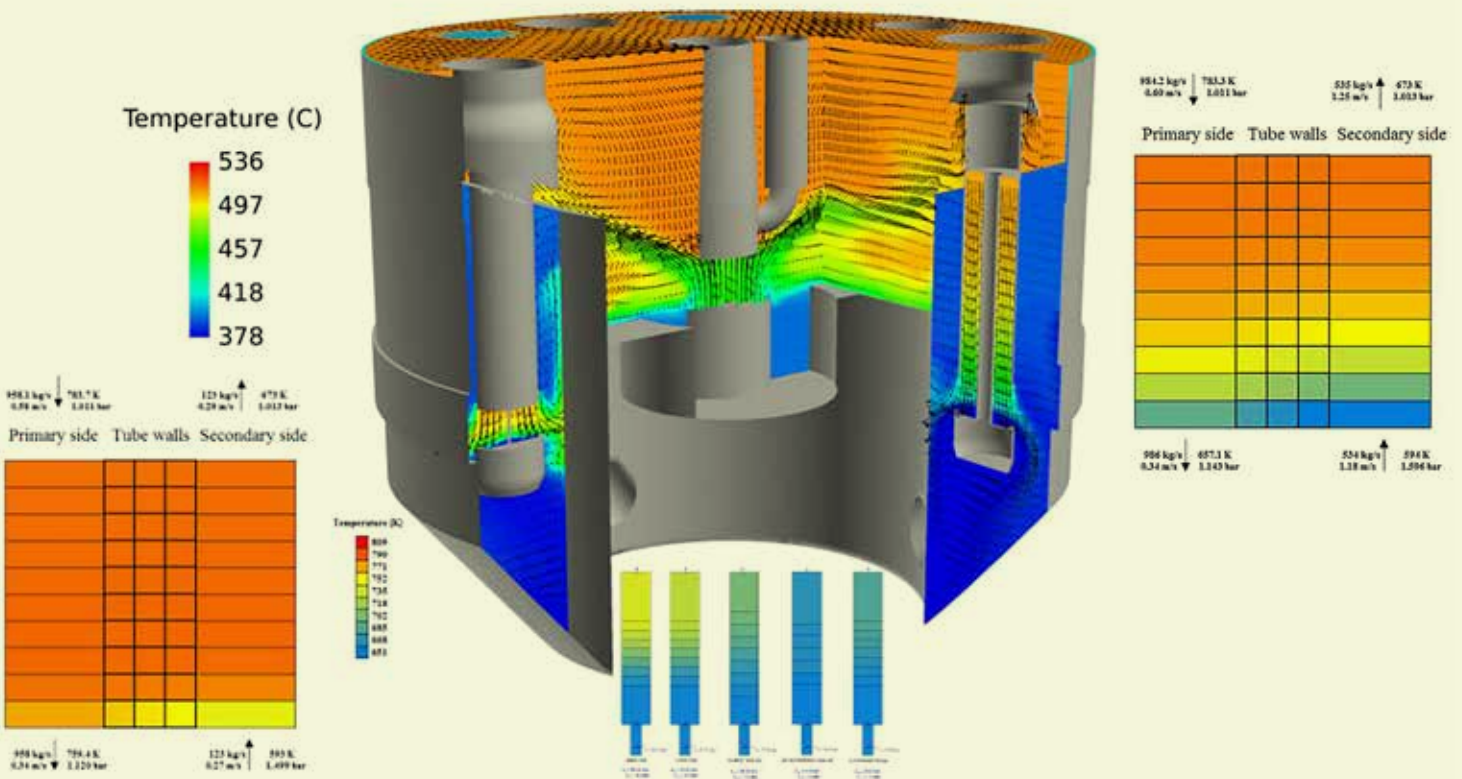
kleine volumes waar je voor uitrekent wat de stroomsnelheid of temperatuur ter plaatse is. "Dat konden we in 2005 al. Als je een goede berekening wil doen met betrekking tot de bedrijfscondities heb je misschien wel een miljoen cellen nodig en dat lukte in 2010. Als je dat ook nog eens tijdsafhankelijk wil doen, waren we daar in 2012 aan toe. Ga je dan opschalen naar modelleertechnieken voor turbulentie richting LES-modellen (Large Eddy Simulation) met honderdmiljoen cellen, dan kunnen we dat nu zo'n beetje. Als we dat nog verder willen opschalen naar "numerieke experimenten" ofwel DNS-modellen (Direct Numerical Simulation) dan zou dat naar schatting mogelijk zijn in 2050 voor een enkel koelkanaal." Als je uitgaat van de wetmatigheid van Moore's law, de aanname dat de rekenkracht elke twee jaar verdubbelt, kunnen we in 2070 misschien een compleet splijstofelement op die manier doorrekenen.

**MULTI-SCALE BEREKENINGEN**

Al vijftig jaar geleden verschenen de eerste metaalgekoelde reactoren in de VS. "Maar dat werd gedaan door heel veel onzekerheden in hun ontwerp mee te nemen en grote veiligheidsfactoren te gebruiken. Je kunt je afvragen of wat wij doen nodig is en een reactor overdimensioneren, bouwen en in

bedrijfstellen. En zo nodig aanpassingen uitvoeren. Maar ik weet niet of dat in de huidige situatie verstandig is." De eerste reactor die ooit stroom leverde was een metaalgekoelde reactor. "In die tijd speelden kosten geen rol. Tegenwoordig willen we energie genereren tegen een redelijke prijs en concurreren met gas en steenkool zonder daarbij concessies te doen aan de veiligheid. CFD-simulaties helpen daarbij. Maar we zien ook dat CFD heel veel rekenkracht vergt. Daarom werken we ook aan methodes waarbij we 3-D CFD alleen gebruiken waar nodig en waarbij we andere stukken van het reactorsysteem met grotere elementen uitrekenen. Dit noemen we dan multi-scale berekeningen. Een voorbeeld daarvan laten we zien in onderstaande figuur van een berekening voor de Franse natrium gekoelde Superphénix-reactor."

Dit soort technieken dragen bij aan efficiëntere, veiligere en goedkopere reactoren in de toekomst. De eerste reactoren werden weliswaar gemaakt zonder dat de bouwers de beschikking hadden over computers. "Wat ongelooflijk knap is dat geweest. Echter, tegenwoordig en in de toekomst is de verwachting dat ontwerpers en regelgevers veiligheidsanalyses willen zien met steeds geavanceerdere gevalideerde rekenmethodes. Bij NRG dragen we daar onze steen aan bij." **K**



➤ Berekening van een Phénix reactor-experiment gebruik makend van 3D CFD en een rekenmethode met grote elementen (uit het boek 'Thermal Hydraulics Aspects of Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors').

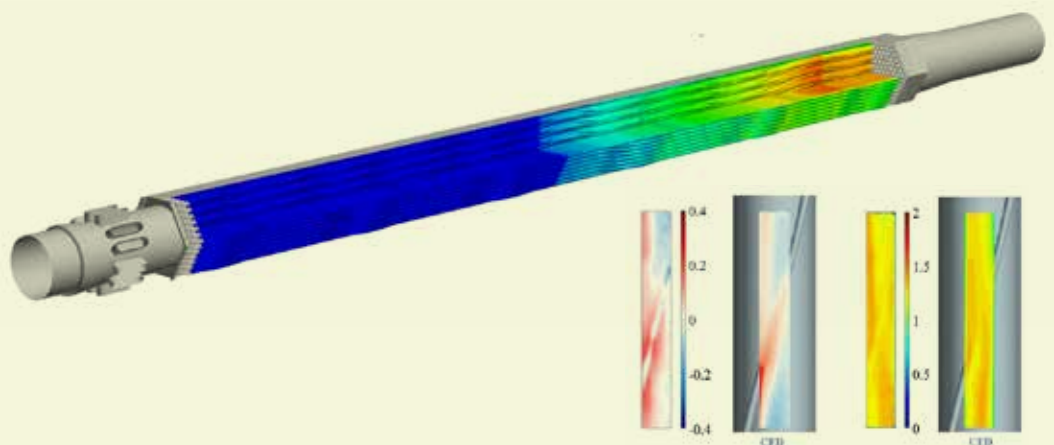
## MYRRHA



**NRG werkt nauw samen met onderzoekers van het onderzoeksinstituut SKC•CEN in het Belgische Mol aan de Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications, ofwel: MYRRHA. In Mol zelf werken 150 ingenieurs, wetenschappers, technici en administratieve assistenten uit 27 verschillende landen aan MYRRHA. Binnen NRG is Ferry Roelofs een van de medewerkers die zich als specialist op het gebied van thermo-hydraulische simulaties onder meer bezig houdt met het warmtetransport in MYRRHA.**

Roelofs: "MYRRHA wordt gebouwd in drie fasen. In de eerste fase is het de bedoeling de versneller tot 100 MeV (mega-elektronvolt) te bouwen en daarnaast één of twee onderzoeksstations te bouwen. Het gaat hierbij om één station dat wordt ingericht om radio-isotopen te produceren en één voor het doen van materiaalonderzoek." Fase 1 dient om de betrouwbaarheid van de versneller aan te tonen.

Normaal gezien stopt zo'n grote versneller vaak – bijvoorbeeld 2000 keer per jaar. Bij MYRRHA willen ze het aantal stops die langer dan drie seconden duren terugbrengen tot tien per kwartaal. De versneller moet dus zeer betrouwbaar zijn. Dat gaat volgens de organisatie lukken dankzij een fouttolerant ontwerp waarin activiteiten het van elkaar kunnen overnemen en door redundantie bij de injector. Roelofs: ➤



➤ Experimentele opstelling SEEDS-2 bij de TU Delft en vergelijking tussen meetdata en simulatieresultaten (uit Roelofs et al. en Dovizio et al., 2019)

“De uitdaging is dus om de versneller ordens betrouwbaarder te maken dan bestaande versnellers. De vraag die rijst is natuurlijk: kunnen we dit inderdaad zoals we willen en is het mogelijk om hem vervolgens op te schalen.” Fase 2 dient voor de verdere ontwikkeling van de versneller zodat hij met 600 MeV sterk genoeg is om de reactor te kunnen voeden. Fase 3 is de bouw van de reactor, dus de complete opbouw en afwerking van MYRRHA en die staat gepland voor 2026-2033. Roelofs: “Voor MYRRHA hebben we binnen NRG al heel veel gedaan, al sinds eind jaren negentig ben ik bij MYRRHA betrokken. We hebben verschillende thermo-hydraulische aspecten van de reactor geanalyseerd, maar ook bijvoorbeeld bestralingen in onze Hoge Flux Reactor uitgevoerd in lood-bismutkoelmiddel.” Roelofs houdt zich onder meer bezig met het warmtetransport in MYRRHA. “Het is een doorlopend proces. Hoe ziet dat eruit voor een splijstofelement, in het complete reactorvat en uiteindelijk in het hele systeem?” Recent is een publicatie over de analyse van het warmtetransport in metaalgekoelde splijstofelementen uitgebracht waaraan vooraanstaande experts uit Europa en de Verenigde Staten bijdragen leverden. “Deze publicatie laat zien waar we op dit moment staan, wat we weten, maar ook wat we nog niet weten en waaraan we nog moeten werken.”

### MYRRHA MOCK-UP E-SCAPE

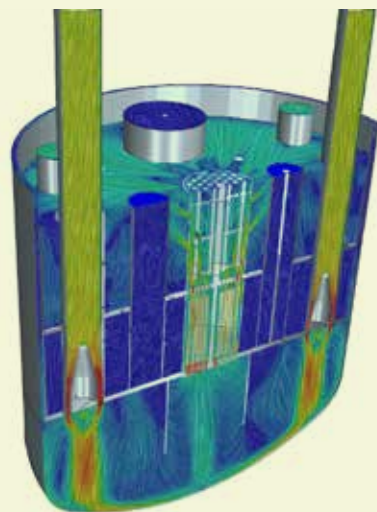
Naast het warmtetransport wordt ook de veiligheid van het systeem onderzocht. “Waar zitten de uitdagingen op het gebied van veiligheid? Dat zijn dingen die je onder de knie wil hebben voor het eerste model of zelfs een eerste elektrische mock-up er staat.” Een elektrische mock-up is een fysiek (schaal)model van het uiteindelijk ontwerp waarin de kern nagebootst wordt door elektrische verwarmingselementen. Zo’n schaalmodel zal altijd nodig zijn maar je wilt het aantal te bouwen mock-ups natuurlijk wel beperken en dat kan volgens Roelofs met behulp van simulaties. “Voordat je een experiment gaat bouwen gaan we eerst rekenen om te weten hoe een experiment eruit komt te zien. Dan weten we ook waar we onze instrumentatie in het experiment moeten positioneren. Dikwijls betekent dat, dat we een aantal verschillende ontwerpopties simuleren. Als we dat allemaal bedacht hebben in de ‘pre-test fase’, dan gaan we het experiment bouwen, de metingen doen en vervolgens terug naar het model om de post-test simulaties te doen.” In de post-test fase gebruiken we dan de gemeten waarden in plaats van de aangenomen waarden, bijvoorbeeld ten aanzien van stroomsnelheden en temperaturen, maar ook ten aanzien van afmetingen. “Deze post-test berekeningen leveren dan als het goed is een gevalideerd model op. En ook hier geldt, hoe meer je meet en valideert, hoe meer vertrouwen je krijgt in de modellen die je maakt van de hele machine. Het bouwen van zowel experimenten als de uiteindelijke reactor is uiterst kostbaar.”

### E-SCAPE

Om een compleet beeld te krijgen van wat er in het reactorvat van MYRRHA gebeurt, vindt in Mol een geschaald experiment plaats:

E-SCAPE (European SCAled Pool Experiment). Dit experiment dient ter ondersteuning van het ontwerp en de vergunningverlening door experimentele analyse van het thermo-hydraulisch gedrag in de E-SCAPE-faciliteit. De vraag die daarbij naar voren komt is: Kan de kernkoeling in de lood-bismutgekoelde MYRRHA-reactor gegarandeerd blijven onder normale bedrijfsomstandigheden (inclusief passieve vervalwarmte verwijdering) en in geval van onverwachte gebeurtenissen ook? “Het leert het ontwerpteam in België hoe ze om moeten gaan met lood-bismut maar natuurlijk gebruiken we het experiment ook om de rekencodes die wij erop loslaten te kunnen valideren. In dit vat zijn heel veel thermokoppels aangebracht met aan de zijkanten allerlei poorten om op termijn met ultrasonische metingen de vloeistofsnelheden te meten om gelijktijdig een idee te krijgen hoe de stroom en temperatuur verdeeld zijn. Ongetwijfeld gaan we afwijkingen zien tussen meetdata en onze berekeningen. Daarvan willen we leren om zo tot een betere modelvorming te komen zodat we in staat zijn het thermo-hydraulisch gedrag van de reactor goed te voorspellen.”

De experimentele faciliteit E-SCAPE is een thermo-hydraulisch 1/6 schaalmodel van het primaire systeem van de MYRRHA-reactor, met een elektrische kernsimulator, gekoeld door lood-bismut. Het geeft de ontwerpers experimentele feedback over de natuurlijke en geforceerde convectiestromingspatronen. Bovendien levert het waardevolle experimentele gegevens voor de validatie van thermische hydraulische codes voor hun gebruik met lood-bismut. Roelofs: “Dit experiment heeft een ontwikkeling gehad van vijftien jaar, van eerste idee tot uiteindelijke realisatie. Een vergelijk met eerste meetdata, die ter beschikking kwamen in 2018, liet zien dat berekeningen goed overeenkomen met de uiteindelijke metingen. Dat betekent aan de ene kant dat wij goede simulatiemethodieken hebben en aan de andere kant het MYRRHA-team in België een goed en gecontroleerd experiment heeft ontworpen en gebouwd.” **K**



➤ *Simulatie van het E-SCAPE experiment met de elektrische kernsimulator in het midden en de pompen aan de zijkanten.*





## GEAVANCEERDE REACTORTECHNOLOGIEËN IN MEERJARENONDERZOEK NRG



**In het kader van de Energiedialoog heeft de Vereniging Nucleair Nederland (NNL) in 2016 op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken een Roadmap voor kernenergie opgesteld waarin de bijdrage van kernenergie binnen een CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening op korte, middellange en lange termijn wordt beschouwd. Geert-Jan de Haas, programmamanager bij NRG vertelt hoe NRG betrokken is bij de ontwikkeling van de lange-termijn geavanceerde reactortechnologieën zoals de geavanceerde, metaalgekoelde en gesmolten zoutreactoren (MSR). De Haas licht daarbij de specifieke keuze toe voor onderzoek naar deze geavanceerde reactortechnologieën binnen het meerjarenonderzoek van NRG.**

### DE ROADMAP

In 2013 is met 47 partijen het Energieakkoord gesloten. De afspraken die daarin zijn opgenomen lopen tot 2023. In de Energieagenda beschrijft de overheid hoe Nederland in 2050 80-95% minder CO<sub>2</sub> uitstoot en hoe de route daarnaartoe verloopt. Het doel van de agenda is onder meer om bedrijven en lokale overheden zekerheid te bieden opdat zij hun plannen erop kunnen afstemmen. In 2016 kwamen allerlei partijen bij elkaar voor het invullen van de Energieagenda. Een aantal van die partijen kwam in Delft bijeen om de mogelijkheden van nucleair bij deze ontwikkeling te betrekken. De Haas: "Het was het ministerie van Economische Zaken die destijds aan Nucleair Nederland heeft gevraagd om een dergelijke sessie over kernenergie te beleggen." Tijdens die bijeenkomst werd Nucleair Nederland verzocht of zij kernenergie in een perspectief kon plaatsen en een en ander in een Roadmap op kon nemen, of zoals De Haas het formuleert: "Hoe zie je het aandeel nucleair

binnen een CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening in Nederland en hoe zou dat vorm en inhoud kunnen krijgen."

De Haas vertelt dat de Roadmap de bijdragen van kernenergie op drie termijnen beschouwt: de korte termijn, middellange termijn en de lange termijn. "Wat betreft de korte termijn kun je bijvoorbeeld denken aan het langer openhouden van de Kerncentrale Borssele (KCB) of kijken naar de inzet van Gen-III-reactoren zoals de European Pressurized Reactor (EPR) om daarmee te kunnen voorzien in regelbaar vermogen in combinatie met wind en zon. Voor de middellange termijn kun je denken aan de toepassing van technologieën die nu al redelijk zijn uitgekristalliseerd zoals de toepassing van hogetemperatuur reactortechnologie. Met name interessant vanwege de uitbreiding in toepassingsgebied, namelijk niet alleen meer voor elektriciteitsopwekking maar ook voor opwekking van hoogcalorische warmte in warmtekracht toepassingen voor de industrie. Verderweg kijkend kom je bij de Gen-IV-technologieën ►

zoals metaalgekoelde reactorontwerpen en gesmolten zoutreactoren." Voor de lange termijn moet gedacht worden aan de inzet van deze innovatieve reactortechnologieën die zijn uitgerust met regelbaar elektriciteitsvermogen en warmtekracht, excellerend op reactorveiligheid en duurzaamheid.

Op dit moment zie je dat kernenergie hoofdzakelijk wordt ingezet voor de opwekking van elektriciteit. Dat geldt voor zowel de huidige Gen-II-reactoren zoals de KCB maar ook voor de Gen-III-reactoren zoals de European Pressurized Reactor (EPR) die op dit moment in onder meer Finland, Frankrijk en het VK worden gebouwd. De Haas: "De energiemix bestaat uit een paar modaliteiten: stroom, transport, laag- en hoogcalorische warmte. Voor de middellange termijn zie je dat hoge temperatuur reactoren goed inzetbaar zouden kunnen zijn voor het opwekken van lage en hoge calorische warmte." Volgens De Haas is dit een haalbaar scenario, niet in de laatste plaats omdat in Duitsland, de VS en China al veel ervaring is opgedaan met HTR-technologie. "En ook NRG heeft al flink aan HTR gewerkt. Het is nu aan de industrie die behoefte heeft aan proceswarmte om de verdere ontwikkeling op te pakken." De Haas wijst er hierbij op dat het ook om de bouw van Small Modular Reactors (SMR) gaat. "Bij SMR denken we vaak aan lichtwater gekoelde reactoren want die zijn op relatief korte termijn te implementeren omdat ze gebruik maken van bestaande technologie, maar je kunt natuurlijk ook aan HTRs denken", licht De Haas toe.

## ADVIESFUNCTIE

De Haas: "Daarnaast is de Roadmap een kapstok met een lange termijnvisie. Gen-IV-technologie is een heel breed veld en je moet een keuze maken waar je je op gaat richten. In de Roadmap

zijn een aantal van die keuzes voorgesteld, keuzes die ook terugkomen in het door het ministerie van EZK gesubsidieerde onderzoeksprogramma van NRG." Een verbindende schakel tussen het programma (de voorstellen, uitvoering en rapportage) en het ministerie is de Externe BeoordelingsCommissie (EBC). De EBC behartigt de belangen van de Nederlandse industrie en beoordeelt als belangrijke schakel tussen NRG en EZ het onderzoeksprogramma tenminste twee keer per jaar; eenmaal met het oog op de toekomst en een keer terugblikkend. Daarnaast heeft de EBC een adviesfunctie naar zowel de overheid als NRG. "De overheid stelt het kader vast. Dat kun je zien als de stam van een boom. De thema's vormen de takken, die je in samenspraak met de EBC vaststelt. De activiteiten zijn de bladeren. De EBC drukt een duidelijk stempel op de programmasamenstelling. Zo was één van de aanbevelingen om ook de ontwikkeling van de (lichtwater gekoelde) SMR in ons programma op te nemen. De ontwikkeling van de SMR zou je dus kunnen zien als een grote tak aan de boom." Een belangrijk deel van het onderzoek krijgt gestalte door bijdragen van NRG aan Europese projecten binnen het kader van het Horizon 2020 programma. "Voor deelname aan nieuwe projecten moet het ministerie van EZK haar akkoord geven, niet in de laatste plaats omdat hiervoor budgetten voor een aantal jaren moeten worden vrijgemaakt."

## FORMULE 1

Zowel bij NRG als bij de TU Delft wordt onderzoek gedaan naar Gen-IV-technologie; innovatieve technologische hoogstandjes die wellicht pas vanaf 2040 hun vruchten afwerpen. Hoe belangrijk is het dan om daar zoveel tijd en geld in te steken? De Haas: "Elke industrie innoveert. Naast een afdeling productie is er altijd een afdeling innovatie en ontwikkeling die zich richt op de toekomst. Wij, Petten en Delft, doen aan de Formule 1 van de nucleaire technologie. In de Formule 1 worden innovaties gedaan die je later weer terugziet in de 'gewone' auto's. Alle componenten van huidige technologieën vinden hun oorsprong in ontwikkelprojecten. Dit geldt voor nucleaire technologie ook met ontwikkelingen die mogelijk in de toekomst algemeen toegepast kunnen worden. Het aardige is dat je nooit weet hoe of wanneer welke uitvinding doorbreekt." Als voorbeeld noemt De Haas het grafietonderzoek bij NRG in de jaren negentig binnen het HTR-programma. Door dit onderzoek is NRG mondiaal specialist op het gebied van grafiet. "Maar, zit er grafiet in onze reactoren? Nee. Zit er grafiet in Gen-III? Nee. Maar in het VK hebben ze een probleem met de levensduurverlenging van hun grafiet-gemodereerde reactoren en daarom vindt er hier in Petten nu commercieel onderzoek naar hun grafiet plaats. Dus ja, die kennis wordt wel degelijk te gelde gemaakt." Een ander "zij het minder aantrekkelijk" voorbeeld is het onderzoek naar

**K** De HFR in Petten is cruciaal om experimenten in situ uit te voeren.



stromingspatronen en warmtetransport in metaalgekoelde Gen-IV-reactoren. “De stromings- en warmtetransportanalyses zijn aantoonbaar van nut voor een beter inzicht in het gedrag van bestaande en geavanceerde watergekoelde reactoren. Technologie is een evolutionair proces.”

## OVER DE GRENZEN

Het is belangrijk om naar de internationale ontwikkelingen en initiatieven te kijken. Deze zomer maakte Frankrijk bijvoorbeeld bekend de ontwikkeling van de natriumgekoelde Gen-IV-ASTRID-reactor op de lange baan te schuiven. “Dat betekent dat de ontwikkeling van dit soort reactoren op een lager pitje komt te staan en je mogelijk je pijlen ergens anders op moet richten.” Het opschorten van ASTRID mag dan een tegenschot voor de ontwikkeling van natriumgekoelde reactoren in Europa zijn, maar kan er ook toe leiden dat de TU Delft of NRG zich met een ander onderzoek ontzettend goed kunnen profileren. “Naast onderzoek naar loodgekoelde reactoren als alternatief voor natrium, hebben wij ons met ons SALIENT-01 gesmolten zoutbestraling zeer goed op de kaart gezet. Het onderzoek trekt wereldwijde aandacht.” De Haas verwijst hierbij naar het succesvol afronden van een testbestraling van gesmolten splijtstofzouten in de Hoge Flux Reactor in Petten; de eerste bestraling in zijn soort sinds het onderzoek hiernaar in de Verenigde Staten in de jaren zestig van de vorige eeuw. Dergelijke testbestralingen zijn cruciaal voor de ontwikkeling van gesmolten zout reactoren. Dit type Gen-IV-reactoren heeft goede kaarten op het gebied van veiligheid en er komt minder langlevend radioactief afval

vrij dan bij bestaande kerncentrales. “Vergeet daarbij niet dat wij de HFR in de achtertuin hebben staan die cruciaal is om experimenten in situ uit te kunnen voeren. Je kunt rekenen en simuleren maar alleen na een experiment ben je in staat om jouw modellen te valideren. Zo weet de hele nucleaire wereld wat er in Petten gebeurt en kunnen we ons Nederland breed ontzettend goed profileren.” Daar komt bij dat met dit soort innovatieve experimenten zoals met gesmolten zouten ook heel veel studenten en medewerkers aantrekt, niet alleen bij NRG maar ook bij de TU Delft, waarmee nauw wordt samengewerkt. De kennis in Nederland zekerstellen door een gevarieerd en op de toekomst gericht onderzoeksprogramma is dan ook van groot belang als Nederland kennisland wil zijn en blijven. “En hebben mensen eenmaal bij NRG gewerkt dan kunnen ze overal in de nucleaire sector in binnen- en buitenland terecht.” Een bijkomend voordeel van SALIENT-01 waar De Haas nog even de aandacht op wil vestigen is dat NRG ook inzicht krijgt over het afval dat vrijkomt. “Dit afval moet een plek krijgen op een efficiënte en veilige manier. Wij doen daar nu ervaring mee op en dat gaat zich op termijn terugbetalen. Eindeloos experimenteren en doorrekenen heeft nut want het stroomt allemaal terug in de kennisbasis.” In aansluiting op SALIENT-01 wordt komend voorjaar in de HFR het onderzoek gestart naar de corrosiebestendigheid van kandidaat-materialen (legeringen) voor de bouw van een gesmolten zout reactor. Uniek onderzoek dat de realisatie van gesmolten zoutreactoren steeds dichterbij brengt. **K**

*Menno Jelgersma*

## RELATIE ROADMAP EN MEERJARIG ONDERZOEKSPROGRAMMA

Het nieuwe onderzoeksprogramma van NRG is vervat in een helder document waarin de onderdelen omschreven staan die worden aangepakt voor een vooraf vastgestelde periode. Het programma 2016-2019 had volgens De Haas eigenlijk een opvolger 2020-2023 moeten krijgen maar er is een ‘tussenjaar’ 2020 voorzien waarin de overheid de nieuwe kaders zal vaststellen op basis waarvan NRG de uitgangspunten voor het nieuwe vierjarenprogramma zal opstellen. Als onderdeel van dit proces heeft het adviesbureau Berenschot het onderzoeksprogramma doorgelicht en aanbevelingen opgesteld waar de overheid mee aan de slag kan.

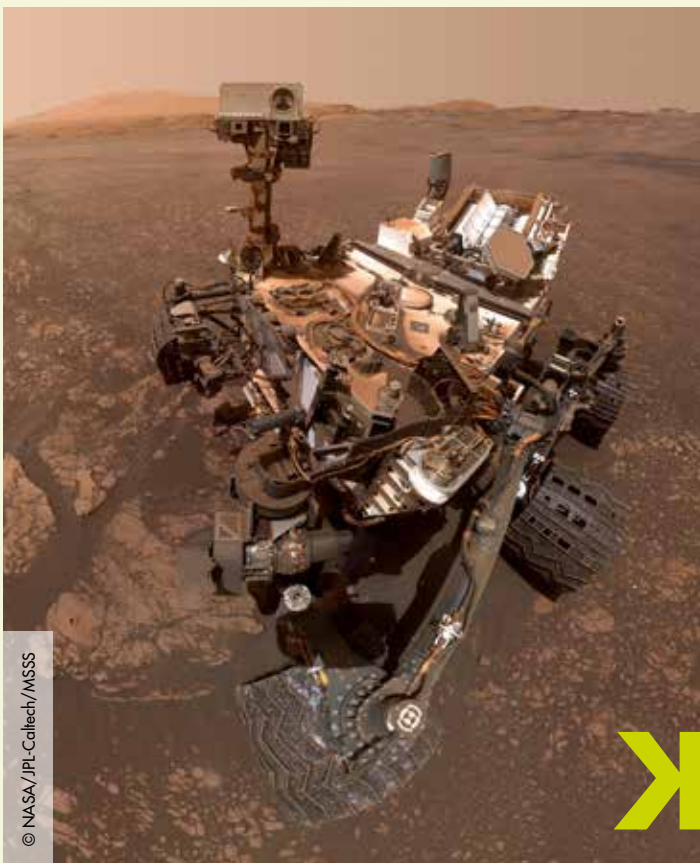
Omdat het één van de beleidsdoelen van de overheid is om ervoor te zorgen dat er een CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening komt, is de relevante vraag die daarbij naar boven komt hoe kernenergie hieraan op de lange termijn kan bijdragen. Een beleidsdoel is leidend en de bestendiging ervan moet besloten liggen in het onderzoeksprogramma. De Roadmap geeft de overheid de nodige informatie, of zoals De Haas het formuleert: “Handen en voeten”, over de mogelijke inzet van kernenergie in Nederland uitgesplitst naar de vier functionele categorieën van energie in onze samenleving zoals hierboven beschreven. Dit is gedaan binnen de uitgangspunten van de toekomstige energiemix zoals neergelegd in het Energierapport opgesteld door het Ministerie van Economische Zaken (EZ, 2016). Bovendien schetst de Roadmap, in aanvulling op de inventarisatie van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland (NNL, 2016), de benodigde kennisinfrastructuur om die inzet van kernenergie te kunnen faciliteren. “De meerwaarde van de Roadmap is dat Nucleair Nederland (met NRG en TU Delft als trekkers) het document in samenspraak met haar leden heeft opgesteld en heeft vastgelegd wat we doen. Wat gebeurt er nou eigenlijk in Delft en Petten, nou dit dus, onomwonden, en in heldere taal inclusief de (cijfermatige) verantwoording. Het stuk staat ergens voor. En als iemand er iets van vindt, laat het horen. We zijn altijd in voor verbeteringen.”

# ZEVEN TE GEKKE SCI-FI KERNREACTOREN

**MET BEHULP VAN DE COOLSTE TECHNOLOGIE VOORZIEN KERNREACTOREN DE SCIENCE-FICTION-WERELD VAN ENERGIE.**



Raketten, krachtige wapens, reflectieschilden, replicatoren, reizen door tijd en ruimte. Voor veel wetenschappers is sciencefiction niet zomaar een verhaaltrant, maar een genre van prikkelende en inspirerende ideeën. Stel dat al deze coole science-fiction-technologie zou bestaan, heb je je dan ooit afgevraagd hoe ontzettend veel energie ze nodig zullen hebben? Natuurlijk, het blijft science-fiction maar sci-fi schrijvers proberen toch om hun verzonnen uitvindingen zo echt mogelijk te laten zijn. Dit betekent dat ze met gigantische, maar voorstelbare energiebronnen op de proppen moesten komen om hun energievretende technologieën aan te drijven. Ook al blijven de media ons vertellen dat nucleair een twintigste eeuw technologie op zijn retour is, sci-fi auteurs hebben zich altijd voorgesteld dat hun ruimteschepen en tijdmachines zouden worden aangedreven door geweldige, geavanceerde kernreactoren. Laten we eens kijken naar zeven kernreactoren die figureren in sci-fi Hollywood en op de televisie.



© NASA/JPL-Caltech/MSSS

## 7. THE MARTIAN: 'RTG'

De iconische sci-fi roman *The Martian* is in 2015 met groot succes verfilmd met in de hoofdrol Matt Damon. Damons personage Mark Watney probeert met moeite een oud ruimteschip te bereiken dat vele kilometers van de beschadigde basis ligt. Watney vertrouwt hierbij op een Radioisotope Thermal Generator (RTG) als energiebron voor zijn Marsrover voertuig. De RTG in *The Martian* is zeker geen verzonnen futuristische technologie – ze worden gebruikt in hedendaagse ruimtemissies. Ze maken gebruik van de vervalwarmte van Plutonium-238 om elektriciteit te maken. Niet al die hitte kan worden gebruikt, een gedeelte verdwijnt in de omringende ruimte. Dat is waarom Mark Watney maar wat graag een RTG gebruikte in de koude nachten op Mars. RTGs worden ook wel nucleaire batterijen genoemd en ze zijn de energiebron die menige verre ruimtemissie mogelijk maakte. Vooral de missies naar de uithoeken van ons zonnestelsel waar het zonlicht zwak is of missies die lang duurden. De krachtigste batterij die tot dusverre is gebruikt, zit in de Marsrover Curiosity; een wetenschappelijk laboratorium van één ton op wielen dat al sinds augustus 2012 non-stop aan het werk is.



## 6. TOTAL RECALL: MARTIAN REACTOR

Om nog maar even bij het Mars-thema te blijven; in de film Total Recall uit 1990 weet actieheld Arnold Schwarzenegger iedereen (en zichzelf) te redden door de atmosfeer op Mars te herstellen, waarmee hij de mensen op de planeet bevrijdt van de absurd hoge zuurstofprijzen van de corrupte gouverneur Cohaagen's. Hoe doet Arnie dat?

Alhoewel het niet in het originele boek van Phillip K. Dick staat, is in de film Mars bewoond geweest door een buitenaards leven dat gebruik maakte van een ondergrondse kernreactor in een poging om een de planeet leefbaar te maken. De reactor kon zuurstof genereren (en waarschijnlijk ook stikstof) en opslaan diep in het binnenste van de planeet. Het lukt Arnie aan het eind van de film om de reactor aan de praat te krijgen en een verse nieuwe atmosfeer te creëren voor de mensen op Mars.



© Screenshot Youtube: Total Recall 1990



## 5. TERMINATOR: Iridium NUCLEAR ENERGY CELL

Het lijkt erop dat Arnold Schwarzenegger een zwak heeft voor nucleaire technologie. De T-800 serie terminator robots leken wel Duracell-konijntjes; ze bleven maar door gaan. Waar haalden ze die onuitputtelijke energie vandaan? "Ik zal je voor altijd achtervolgen... tenminste... tot mijn nucleaire batterij op raakt na 1.095 dagen." Het blijkt dat iedere terminator is uitgerust met een iridium nucleaire batterij die genoeg energie genereert om 24/7, drie jaar op vol vermogen te draaien. Dit verklaart ook waarom Sarah Connor zo veel moeite had om deze monomane robot met 'bindings-problematiek' van zich af te schudden. ➤

© User-Pyon / Shutterstock.com

#### 4. IRON MAN: ARC REACTOR

Iedereen heeft de stunts van miljonair genie Tony Stark als Iron Man in de Avengers-films wel gezien: raketten, wapens, schilden, telecoms, hij krijgt het allemaal voor elkaar. De energie die voor al die dingen nodig is komt van de Arc Reactor die is uitgevonden door Tonys vader, Howard. De Arc Reactor maakt gebruik van kernfusie voor een schier onuitputtelijke schone energiebron. Arc Reactors kunnen groot zijn of zo klein als een cola-blikje, zelfs de kleinste hebben genoeg energie om de high-tech Avengers toren voor een jaar van energie te voorzien. Verschillende aanpassingen van de Arc Reactor zijn voorbijgekomen in de franchise, te beginnen met een mini reactor in Tony Stark's borstkas die hem in leven hield ondanks een granaatscherf wond en culminerend in een versie gebaseerd op de Tesseract: een vreemd object met oneindige energie dat kan worden gebruikt voor zowel goede als kwade doeleinden. Wat dan ook geweldig is, is dat het MIT op dit moment werkt aan de ontwikkeling van een echte Arc reactor, hierbij gebruik makend van de state-of-the art supergeleidende materialen voor hoge temperaturen.



© Usa-Pyon / Shutterstock.com



© Shutterstock.com

#### 3. BACK TO THE FUTURE: FLUX CAPACITORS EN HUN ENERGIEBRONNEN

Reizen door de tijd in Back to the Future, of het nu in een vliegende DeLorean is of een gepimpte stoomtrein, zou niet mogelijk zijn zonder de briljante 'Doc' Emmet Brown en zijn flux capacitor. Het enige probleem was dat de flux capacitor energie vrat, 1,21 GW om precies te zijn. Zonder voldoende energie kon een tijdreiziger vast komen te zitten in de verkeerde tijd, iets wat Marty bijna overkwam in de eerste film.

1,21 gigawatt is zo ongeveer wat een typische grote lichtwaterreactor, zoals die tegenwoordig overal op de wereld draaien, produceert. In de eerste film voorziet Doc in de benodigde energie met een op plutonium draaiende kernreactor. Heel goed dat hij het nucleaire afval recycleert zoals ook de volgende generatie reactoren, bijvoorbeeld de Moltex, dat kunnen! In latere films zoekt hij het een stapje hoger op met een fusiereactor die waterstofatomen oogst uit afval (één enkele bananenschil volstaat).

## 2. STARWARS: HYPERMATERIE REACTOREN

Een opsomming van sci-fi reactoren is niet compleet zonder Star Wars. Reactoren die worden aangedreven door exotische 'hypermaterie' annihilatie spelen een sleutelrol bij het interstellair reizen door het universum van George Lucas. De reactoren versnellen 'tachyons' tot oneindige snelheden waardoor er op lichtsnelheid kan worden gereisd. De kernen van de hypermaterie-annihilatie zijn op hun beurt ingesloten in een nucleair fusiesysteem.

Niet alleen zorgt nucleaire technologie ervoor dat de Millennium Falcon van nul tot supersnelheid kan optrekken voordat je 'Wookiee' kan roepen, het voorziet ook de rest van de planeten van energie: speeders, blasters, lichtsabels en wat al niet meer!



© Falcon: Shutterstock

## 1 STAR TREK: EEN NUCLEAIR AANGEDREVEN UTOPIA

Wanneer Captain Jean-Luc Picard in Star Trek: the Next Generation op een relaxete sub-lightsnelheid wilde cruisen, zette hij op de USS Enterprise de door nucleaire fusie gedreven 'impulse drives' aan. En als hij haast had, ging hij over op 'warp drive' en bereikte hij snelheden sneller dan het licht door het ruimte-tijd-continuüm om het ruimteschip te 'warpen'. De fenomenale hoeveelheid energie die het moet kosten om ruimte en tijd te buigen is afkomstig van een materie-antimaterie-reactor die wordt gereguleerd door een mysterieus kristal, dilithium geheten. De reactor zorgt voor een magnetisch plasma dat reageert met de warp spoelen om zo een ruimte-tijd 'bubbel' te creëren die het ruimteschip omvat. In warp drive modus is het niet zozeer de Enterprise die door de ruimte reist als wel dat de ruimte voor en achter het schip worden uitgerekt en samengeperst waardoor de bestemming als het ware naar de Enterprise wordt getrokken... of zoiets. Het verbazingwekkende is dat een gelijksoortige manier van tijdreizen mogelijk kan zijn volgens Einsteins relativiteitstheorie!



© Shutterstock.com

Fissie, fusie, antimaterie of zelfs (tot nu toe) fictieve hypermaterie hebben iets gemeen: ze maken allemaal gebruik van de energie in de nucleus van het atoom. Of, zoals bij de antimaterie, de energie van de massa zelf. Die enorme hoeveelheid energie komt van een reactor klein genoeg om in een ruimteschip te passen, of in een voertuig, of in een ruimtepak. Het is deze energiedichtheid die nucleair een voor de hand liggende keuze maakt voor sci-fi technologie. En mocht je je nu afvragen: Al deze coole sci-fi reactoren en geen woord over Isaac Asimovs Foundation serie? Terwijl daar het belangrijkste uitgangspunt is dat er zonder kernenergie geen vooruitstrevende samenleving mogelijk is? Vrees niet, de boeken brengen zulke interessante vragen op, dat ze een eigen artikel verdienen. Houdt de website van Generation Atomic maar in de gaten! **K**

Bron: David Watson – <https://medium.com/generation-atomic>



**AANKONDIGING**

## **JAARVERGADERING KIVI KE & NIEUWJAARSSYMPOSIUM KIVI KE - NNS**

De jaarvergadering met mini-symposium vinden plaats op **vrijdag 24 januari** in het KIVI-gebouw, Prinsessegracht 23, 2514 AP Den Haag.

**DE VERGADERING BEGINT OM 13:30 UUR  
AANSLUITEND VINDT HET MINI-SYMPOSIUM  
PLAATS**

De vergadering is toegankelijk voor leden van KIVI KE, begunstigers van NNS en voor begunstigers van Kernvisie. Tijdens de vergadering hebben alleen leden van KIVI KE stemrecht.

**HET SYMPOSIUMPROGRAMMA VOORZIET IN  
TWEË SPREKERS EN ZIET ER VOORLOPIG ALS  
VOLGT UIT:**

- **SANDER DE GROOT (NRG)**

**PROGRAMMANAGER VAN HET FIELD-LAB IN PETTEN  
PRESENTATIE OVER ACHTERGROND EN DOEL VAN HET FIELD-LAB.**

- **ROBIN DE KRUIJF (TUD)**

**VERTELT OVER HAAR WERK BIJ ARGONNE NATIONAL  
LABORATORY EN BIJ TU-DELFT.**

Te zijner tijd is nadere informatie beschikbaar op de site **KIVI.nl**



Stichting **KernVisie**  
EEN ENERGIEK INITIATIEF

E-mail: [kernvisie@kernvisie.com](mailto:kernvisie@kernvisie.com)

De Stichting KernVisie streeft naar het vergroten van het draagvlak voor nucleaire technologie en al haar toepassingen. Haar communicatiemiddelen zijn het tweemaandelijks Kernvisie Magazine en de website.

Het Magazine wordt verstuurd aan begunstigers van de Stichting, leden van NNS en KIVI-Kerntechniek waarvan de gegevens die nodig zijn voor verzending bij de Stichting bekend zijn en aan andere belanghebbenden. Daarnaast verzorgen vertegenwoordigers van de Stichting lezingen en gastcolleges. De Stichting streeft ernaar om de informatie over kerntechnologie toegankelijk en aantrekkelijk te maken voor haar lezers en bezoekers van hun website.

Leden van NNS en KIVI-Kerntechniek kunnen zich, met vermelding van NNS resp. KIVI-KE en lidmaatschapsnummer, voor het Magazine aan- of afmelden via het contactformulier op de website van Kernvisie [www.kernvisie.com](http://www.kernvisie.com)