



# Onderzoeksjaarverslag NRG 2023

*Nucleaire professionals aan het woord*



**Nuclear. For life.**





# Inhoud

NRG is een internationaal erkend nucleair expertisecentrum. De onderneming produceert isotopen, verricht nucleair technologisch onderzoek, is consultant op het gebied van veiligheid en betrouwbaarheid van nucleaire installaties en dienstverlener in stralingsbescherming.

Met haar onderzoek draagt NRG bij aan de instandhouding, innovatie en verdere ontwikkeling van de kennis in Nederland op het gebied van nucleaire technologie en veiligheid.

NRG is wereldmarktleider in de levering van medische isotopen. In Nederland is NRG hét kenniscentrum op het gebied van integrale stralingsbescherming. NRG exploiteert de Hoge Flux Reactor die eigendom is van de Europese Unie. Bij de onderneming werken ongeveer 800 medewerkers. Met hun hoogwaardige kennis dragen zij bij aan de excellente resultaten van partners in de gezondheidszorg, de energiemarkt, de industrie, overheden en de wetenschap.

Voorwoord: Draagvlak gebruik van nucleaire technologie groeit en blijft groeien Bertholt Leeftink		4	
Kernenergie als lesmodule bij natuurkunde Cornelis Zandt	6	Onderzoek naar MOX-splijtstof snelle reactoren weer opgestart Sander van Til	18
NRG rekent aan Finse nucleaire stadsverwarming Bart Verdonschot	8	Sorteermethode voor vrijgave van uitgestraald laagactief afval Sander Nievaart	20
Uncertainty Quantification: Meer zekerheid over de onzekerheid Julia Bartos	10	Veilige werkwijzen rond therapeutische isotopen met alfaverval Ellis Winters	22
NRG ontwikkelt computercode om het gedrag van bellen te snappen Victor Habiyaemye	12	Ervaring NRG essentieel voor Nederlandse nucleaire nieuwbouwplannen Marieke van Gemert	24
Verbrast reactorvatstaal is thermisch te revitaliseren Murthy Kolluri	14	Waterstofeconomie: kernenergie en waterstofproductie Jan Meulenbrugge	26
Betaalbare plastics vervangen klassieke materialen Patrick Haaß	16	Nuclear Academy: studenten zijn de 'workforce' van morgen Robert Beekveldt	28

Afbeelding cover: Cornelis Zandt: "Kernenergie als lesmodule bij natuurkunde", zie interview op pagina 6.



# Voorwoord: Draagvlak gebruik van nucleaire technologie groeit en blijft groeien

*Niet alleen in Nederland, ook wereldwijd groeit de belangstelling voor kernenergie. Tijdens de VN-Klimaatconferentie in Dubai (december 2023) kwam het tot de historische oproep: verdrievoudig kernenergie vóór 2050. Een paar maanden later volgde de allereerste Nucleaire Energietop in Brussel (maart 2024). Wereldleiders uit meer dan 30 landen benadrukten dat meer financieringsmogelijkheden, meer nucleair onderwijs en meer proactieve steun aan kernenergie de sleutel vormen tot succes op de lange termijn.*

De uitkomsten van deze twee toppen zo kort achter elkaar tonen dat nucleaire technologie steeds meer wordt gezien als essentieel om de klimaatdoelen te halen. Hiermee kunnen we de gewenste energiezekerheid, klimaatneutraliteit en duurzame ontwikkeling binnen handbereik krijgen.

## Voorloper

Nederland trekt inmiddels het been ruimschoots bij als het gaat om kernenergie. Niet als panacee of silver bullet, wel als onderdeel van een evenwichtige energie mix. Door de Tweede Kamer wordt aangedrongen op de bouw van vier grote kerncentrales; een verdubbeling van de reeds geplande twee. De ontwikkeling van Small Modular Reactors (SMR's) heeft een boost gekregen met de recent gepubliceerde Programma-aanpak SMR, waar provincies een cruciale rol in zullen krijgen. Onderzocht wordt hoe de kerncentrale in Borssele op een veilige manier langer in bedrijf kan blijven.

Het bedrag voor nieuwe kerncentrales én de ontwikkeling van SMR's is verhoogd van 4,5 naar 14 miljard euro. De Nederlandse overheid zal deze realisatie niet zelf doen – dat is aan marktpartijen – maar neemt een belangrijke, stimulerende regierol. Onderzocht wordt welke positie de overheid zelf in dit proces zal

innemen, waarbij een staatsdeelneming wordt overwogen.

De Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur is essentieel om de nieuwe ambities te realiseren. Dat besef is echt doorgedrongen. Het afgelopen jaar zijn – voor het eerst in decennia – concrete stappen gezet om de nucleaire kennis en kunde te versterken. Tot 2030 komt er 65 miljoen euro beschikbaar voor de kennis- en innovatie-infrastructuur op het gebied van nucleaire technologie. En er komt 65 miljoen euro voor de ontwikkeling van Small Modular Reactors.

## Versterken kennispositie

NRG PALLAS juicht deze ontwikkelingen van harte toe. Het doel van onze inspanningen is om de Nederlandse kennispositie te versterken en bij te dragen aan de ontwikkeling van veilige en duurzame klimaatneutrale energieoplossingen. NRG PALLAS maakt deel uit van de vitale en internationaal hoog aangeschreven Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur. Hoogwaardige, onafhankelijke inhoudelijke nucleaire kennis en kunde zijn noodzakelijk om alle plannen op een veilige en verantwoorde manier te kunnen verwezenlijken. Daar profiteert uiteindelijk ook de Nederlandse burger van.

Hoe wij bijdragen kunt u lezen in de interviews met onze NRG PALLAS collega's in dit

## Bertholt Leeftink:

Nucleaire technologie wordt steeds meer gezien als essentieel om klimaatdoelen te halen.



toegankelijk geschreven verslag. U leest hoe onze gedreven medewerkers samen met TU-Delft nucleair onderwijs stimuleren. In de klas op de middelbare school, via MBO, HBO tot op de universiteit. Dat gebeurt met woord en daad: van lesmodules, praktijkonderwijs tot afstudeerplekken.

## Kernenergie en waterstof

Ook opmerkelijk: onze bijdrage aan een EU-onderzoek naar de combinatie van kernenergie en waterstofproductie. Daar wordt veel van verwacht. Het kan veilig en verantwoord en is vooral een economisch vraagstuk.

Lees vooral ook over onze bijdrage aan de ontwikkeling van nucleaire stadsverwarming. Wij mogen meehelpen aan de ontwikkeling van deze Finse toepassing van een Small Modular Reactor. Het zou me niets verbazen als ook in Nederland dit idee gaat aanslaan. Goed beschouwd zijn natuurlijk alle artikelen interessant. Ons werk draagt immers bij aan meer veiligheid, grotere efficiency en duurzamere toepassingen van nucleaire technologie.

## Kernfysicus als minister

Ten slotte wil ik hier nog de woorden aanhalen die IAEA-directeur-generaal Rafael Mariano Grossi sprak in Brussel: “Het erkennen van de noodzaak van kernenergie is niet genoeg. Het is aan politieke leiders om een omgeving te creëren die de ontwikkeling van kernenergie stimuleert.” Met de aankondiging dat in het nieuwe kabinet kernfysicus Eppo Bruins minister van Onderwijs zal worden, denken wij dat in ons land deze woorden beslist gehoord zullen worden.

Ik hoop dat u met warme belangstelling kennisneemt van onze bijdragen aan het welslagen van de energietransitie.

Bertholt Leeftink,  
CEO NRG PALLAS

# Kernenergie als lesmodule bij natuurkunde

Na het succes van de lesmodule 'medische beeldvorming' voor HAVO/VWO is er nu ook een module 'kernenergie'. Het toegankelijk en bekendmaken van nucleaire technologie is één van de doelen van NRG. "Vroeger bereikten we vooral de hoger opgeleide collega's in aanpalende vakgebieden en universitaire studenten. Wij als NRG-trainees hebben het roer omgegooid: op de middelbare school hebben leerlingen grote belangstelling voor nucleaire technologie."

Cornelis Zandt is econoom en natuurkundige. Nadat hij een tijdje op een universiteit had gewerkt als klimaatwetenschapper/energie-deskundige, maakte hij een carrièreswitch. "Ik stroomde als trainee in bij NRG. Ik wilde meer aan de basis staan en niet alleen theoretisch maar ook praktisch bijdragen aan de energietransitie."

De energietransitie houdt een verregaande elektrificatie van de samenleving in. "Naast duurzame bronnen zal ook kernenergie een

belangrijke rol spelen." Dat betekent dat er meer kennis moet komen in de samenleving over wat kernenergie is. "En wat is dan leuker dan hierover lesgeven op een middelbare school?"

## Hip

Een paar jaar geleden was hiermee al een begin gemaakt met de NRG-lesmodule 'Medische beeldvorming'. "Nu kernenergie ook helemaal hip begint te worden, ontstaat er in de klas ook behoefte aan lesmateriaal over kernenergie."



[www.ensuringnuclearperformance.com/rollenspel-kernenergie/download-pagina-lesmodule-kernenergie](http://www.ensuringnuclearperformance.com/rollenspel-kernenergie/download-pagina-lesmodule-kernenergie)



## Cornelis Zandt:

Leerlingen kijken meer naar feiten en hebben minder last van meningen.

Cornelis Zandt ging aan de slag met een lesboek 'Kernenergie' waarin een rollenspel de leerlingen in contact brengt met de verschillende maatschappelijke facetten van energieopwekking. De leerlingen zijn erg enthousiast, blijkt uit een pilot. "In plaats van een half uurtje theorie, gevolgd door een half uurtje sommen maken, zijn ze nu vanuit verschillende perspectieven via een rollenspel met dit onderwerp bezig."

Zo moeten een milieudeskundige, een energie-deskundige en een veiligheidsdeskundige nauw samenwerken om tot een oplossing te komen voor de toekomstige klimaatneutrale energievoorziening in Nederland. "Het gaat daarbij niet alleen over kerncentrales. Ook de combinatie met bijvoorbeeld zon en wind speelt mee." Ook de inzet van CO<sub>2</sub>-producerende kolen en gascentrales zijn onderdeel van het vraagstuk om met een objectief raamwerk de oude en nieuwe situatie te kunnen vergelijken. De opdracht is om ze op een verstandige manier uit te faseren.

## Afgewogen energiemix

De les bestaat uit vier delen. De opdracht is dat de groepjes leerlingen in de laatste les tot een afgewogen energiemix komen. Gaandeweg richting 2050 ontdekken leerlingen dat als je de

hoeveelheid gas en kolen vermindert, kernenergie een belangrijke rol kan vervullen omdat duurzame bronnen wind- en zonlichtafhankelijk zijn.

Zandt zag dat kinderen in de pilot die NRG in de klas hield een heel duidelijke keuze maken. "De leerlingen vonden dat vooral kernenergie nodig is om over pakweg 25 jaar klimaatneutraal te zijn."

De klas lijkt daarmee een trend te volgen die we op dit moment breder in de samenleving zien. "Dat is constructief. Het is goed om juist zo'n belangrijker discussie meer te voeren op basis van technische feiten in plaats van op meningen en gevoelens."

Niet alleen de leerlingen, ook de natuurkundevocenten zijn enthousiast. "Er is veel waardering voor de connectie tussen theorie en de praktijk. En door de interactiviteit van het rollenspel zien docenten ook de wat meer teruggetrokken leerlingen soms helemaal opleven. Een groter compliment kun je niet krijgen."

De lesmodules Medische Beeldvorming en Kernenergie worden inmiddels gebruikt in de klas. "Ze sluiten goed aan bij de eind-examensyllabi en er wordt een docentenboekje bijgeleverd met praktische tips hoe de lessen gegeven worden." Bij de samenstelling van het docentenboekje zijn docenten uit de pilot zelf betrokken geweest.



# NRG rekt aan Finse nucleaire stadsverwarming

**Bart Verdonschot:**

*Nucleaire stadsverwarming is een waardevolle aanvulling in een toekomst zonder gas.*



NRG zet in op de ondersteuning van de ontwikkeling van Small Modular Reactors (SMRs). “Ik verwacht veel van SMRs. Ze zijn goed bruikbaar voor toepassingen waar elektriciteit geen efficiënte oplossing biedt.” Denk aan het maken van industriële proceswarmte en voor bijvoorbeeld waterstofproductie. “Bijzonder is het Finse initiatief om een specifieke kleine reactor te ontwikkelen voor stadsverwarming. Een typisch voorbeeld van de toepassing van een SMR”.

In Helsinki, de hoofdstad van Finland, is de gemiddelde temperatuur in de wintermaanden (december, januari en februari) meestal rond de -5 tot -10 graden Celsius. Het kan er echter ook nog veel kouder worden. Temperaturen onder de -20 graden Celsius zijn geen uitzondering. Koud dus. En dat op het zuidelijkste puntje van Finland!

Vandaar hun innovatieve toepassing van bestaande technologie in een 50 MWth stadsverwarmingsreactor? Het is natuurlijk óók geen geheim dat Finland flink wil investeren

in alternatieven voor Russisch gas. In dat licht bezien is de kleine watergekoelde LDR-50 stadsverwarmingsreactor van Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) wellicht het ei van Columbus. VTT is het Finse Technisch Onderzoekscentrum van de Staat, vergelijkbaar met ons eigen TNO.

## Computermodel

Bart Verdonschot is natuurkundige en werkt bij NRG aan de modellering van de LDR-50 in SPECTRA, een computercode die door NRG zelf is ontwikkeld. “SPECTRA was oorspronkelijk

bedoeld voor traditionele watergekoelde reactoren. Een aantal jaren geleden werd SPECTRA geschikt gemaakt voor andere reactortypen en wordt daar op dit moment ook volop voor gebruikt” Omdat de LDR-50 een kleine, sterk vereenvoudigde watergekoelde reactor is, is het logisch om ook hiervoor SPECTRA te gebruiken.

Met watergekoelde reactoren is inmiddels vele tientallen jaren ervaring opgedaan. Het is bewezen technologie die ook erg veilig is. “De LDR-50 is vanwege zijn eenvoud en compactheid een extra veilig ontwerp. Het primaire (nucleaire) systeem wordt bovendien passief gekoeld: het koelmiddel in de reactor circuleert niet via pompen, maar gaat rond door natuurlijke circulatie.” Dat is een kringloop die is gebaseerd op natuurkundige principes zoals zwaartekracht en gedrag van water onder invloed van temperatuur. “Deze principes zijn nauwelijks vatbaar voor falen. Een pomp kan immers stuk gaan.”

De reactor is bovendien afgescheiden van de buitenwereld door een secundair tussensysteem. Dit maakt dat het vrijwel onmogelijk is dat radioactiviteit uit de kern via het tussensysteem in het stadsverwarmingsnet terecht komt.” De Finnen staan over het algemeen positief tegenover kernenergie; ook de acceptatie zal hier waarschijnlijk geen groot obstakel zijn. Helaas, hoe mooi het ook klinkt, de LDR-50 kun

je nog niet bestellen. Verdonschot: “Ik verwacht dat deze nucleaire stadsverwarmingsreactor pas na 2035 beschikbaar zal komen. Dat is nu eenmaal de tijd die nodig is om het ontwerp te detailleren, te testen en om er een vergunning voor te krijgen.” Want hoewel de hele reactor bestaat uit bewezen technologie, is het concept nog niet vergund. “Wij werken nu mee aan dit vergunningsproces door met computersimulaties aan te tonen dat de reactor onder alle omstandigheden binnen de veiligheidsnormen blijft.”

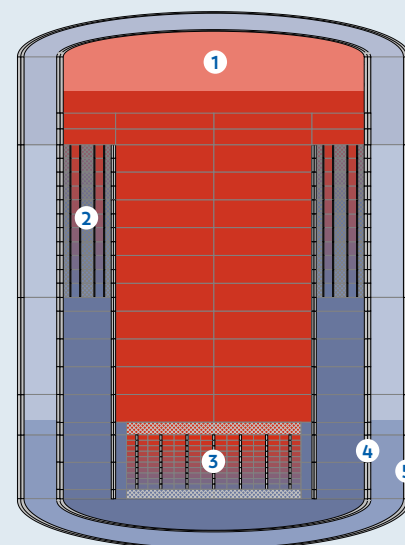
Stap één was voor Verdonschot om de LDR-50 in 2023 na te bouwen met SPECTRA en de globale werking ervan aan te tonen. “Dat is gebeurd, hij werkt nu in SPECTRA.” De volgende stap is nu om het computermodel te gaan voorzien van de nodige detaillering zodat er meer relatie met de praktijk ontstaat. De voorspelbaarheid van het model neemt daarmee ook toe. “Dat proces loopt nu en moet dit jaar worden afgerond.” In 2024 start een Europees project voor verdere analyse van de LDR-50, waar NRG ook aan deel zal nemen.

“Je ziet toch dat de Finnen na de voltooiing van Olkiluoto 3 een flinke stap vooruit hebben gemaakt binnen de nucleaire industrie. Maar nu ontstaat ook in andere EU-landen om allerlei redenen (geopolitiek, klimaat, inpasbaarheid) belangstelling,” besluit Verdonschot. Er is nu ook in andere landen – waaronder Zweden – belangstelling voor dit concept.

**Visualisatie van het LDR-50 model zoals geïmplementeerd in SPECTRA, een computercode die door NRG zelf is ontwikkeld.**

Op de afbeelding zien we hoe gedurende normaal bedrijf water opwarmt in de kern, het warme water (rood) opstijgt naar boven in de reactor en vervolgens in de warmtewisselaar afkoelt naar relatief koud (blauw) water. Het relatief koude water daalt dan naar de onderkant van de reactor en kan opnieuw gebruikt worden in de kern.

Dit proces wordt gedreven door natuurlijke circulatie, waardoor er geen primaire pompen nodig zijn.”



- 1 Drukhouter
- 2 Warmtewisselaar
- 3 Kern
- 4 Reactorbinnenwand
- 5 Reactorbuitenwand

## Uncertainty Quantification:

# Meer zekerheid over de onzekerheid

*Nu de wereld volop aandacht heeft voor nieuwe kerncentrales, is er vanuit de ontwikkelaars ook veel belangstelling voor het nabootsen van wat er zich in zo'n toekomstige reactor afspeelt. "Modelleren en simuleren kunnen we steeds beter en goedkoper. Het is uiteraard wel essentieel om de betrouwbaarheid van een simulatie goed te kunnen beoordelen." Dat lukt bij NRG steeds beter met Uncertainty Quantification (UQ).*

Julia Bartos is neutronica-specialist bij NRG. "Het klinkt misschien wat paradoxaal, maar als we de onzekerheidsmarge van uitkomsten van een berekening kennen, neemt de zekerheid over die berekening juist toe."

Weten hoe betrouwbaar een berekening is, is uiteraard van groot belang bij het modelleren en simuleren van een kernreactor. "We kunnen het proces heel goed nabootsen in een computer, maar hoe betrouwbaar zijn de simulatie-resultaten?"

Het meest betrouwbare is natuurlijk om de resultaten van een simulatie te controleren aan de hand van experimenten. "Helaas. In de kernfysica zijn experimenten vaak complex en duur." En dat, terwijl de rekenkracht van computers juist steeds verder toeneemt en simuleren dus gemakkelijker en goedkoper wordt.

### Het effect van een afwijking

"We benaderen met simulaties de werkelijkheid van wat zich afspeelt in een kernreactor. Maar er zitten mogelijk wel kleine afwijkingen in ten opzichte van de werkelijkheid. Vraag is dan hoe groot het effect is van die die afwijkingen?" Heel praktisch: men gaat bijvoorbeeld uit van een bepaalde dikte van een materiaal bij de berekeningen, maar dat materiaal kan in de praktijk soms enkele fracties in dikte variëren. "Wat is het effect van deze verschillen tussen

model en werkelijkheid? Tussen de uitkomsten van een simulatie en het echte proces in de reactor? Beïnvloeden deze verschillen zaken als reactiviteit, temperatuur en vermogen?" De expertise van Julia Bartos is om deze onzekerheid vast te stellen met Uncertainty Quantification, kortweg UQ. Dit vakgebied houdt zich bezig met het kwantificeren en analyseren van onzekerheden in technisch-wetenschappelijke berekeningen. Bartos: "UQ laat zich het best uitleggen als het bepalen hoe onzekerheden in rekengegevens de onzekerheid in rekenresultaten beïnvloeden." Er bestaan verschillende methoden binnen UQ, Bartos gebruikt de methode van deterministische bemonstering.

De klassieke methode om deze effecten zichtbaar te maken is een 'gewone' bemonsteringsmethode. Er worden berekeningen gemaakt met honderden invoervariabelen met een bepaalde spreiding. "Je voert dan dezelfde berekeningen bijvoorbeeld duizend keer uit met een voorgeschreven kleine variatie op honderden 'monsters' als rekeninvoer. Daarna bepaal je statistisch het effect van deze variatie. Zo kun je dan de onzekerheid uitrekenen."

Dat klinkt als monnikenwerk en dat is het ook. De berekeningen op zich zijn tijdrovend en duren dagen, weken of zelfs maanden. "Ze kosten vreselijk veel computer-rekenkracht en zijn daardoor duur."

### Julia Bartos:

*De deterministische bemonsteringsaanpak trekt de aandacht van ontwikkelaars van SMRs.*



### Van duizenden gegevens terug naar tientallen

De deterministische bemonsteringsmethode kan de hoeveelheid rekengegevens sterk verminderen. "Om de rekenlast te beperken gebruiken we een wiskundige methode om uit de al bestaande gegevens weer nieuwe te genereren." Hierdoor kan het daadwerkelijke aantal berekeningen dat nodig is om de onzekerheid te bepalen drastisch omlaag: van duizenden naar tientallen.

"Om onze UQ-methode te testen en verder te ontwikkelen, maakten we gebruik van een bekend, vereenvoudigd reactormodel." Dit is de wereldwijd gebruikte 'TMI-mini-core', afgeleid van de kern uit de lang geleden gesloten kerncentrale van Three Mile Island (USA). "De TMI-mini-core is een model dat bestaat uit negen splijtstofelementen. Het is internationaal bekend en wordt in diverse reactorstudies toegepast en voorkomt bij ontwikkelwerk al te complex rekenwerk. Later kan vanuit de mini-core verder worden opgeschaald naar een volledige kern." De TMI-minicore geeft veel houvast bij het modelleren en het benchmarken van een simulatie.

Het lukte Bartos om bij zeven onzekere invoerwaarden het aantal benodigde berekeningen terug te brengen van 300 naar 8. "De UQ-methode leverde daarbij een vergelijkbare nauwkeurigheid ten opzichte van de klassieke

methodes waarmee aan de TMI-minicore is gerekend."

Omdat de methode die Bartos toepast zo ongelofelijk veel rekenwerk voorkomt, trekt de deterministische bemonsteringsaanpak internationaal veel aandacht. Onder meer van ontwikkelaars van nieuwe reactortypen, zoals bijvoorbeeld voor kleine modulaire watergekoelde reactoren.



## Inzoomen op kokend water

# NRG ontwikkelt computercode om het gedrag van bellen te snappen

*Aan alles wat de mensheid denkt te weten, ontbreekt nog iets. “Het klinkt voor een buitenstaander misschien raar, maar we snappen nog steeds het ontstaan en het gedrag van bellen in kokend water niet.” Toch is dat van groot belang voor de nucleaire sector. “Bellen in koelmiddel beïnvloeden de koeling van de kern.”*

Victor Habiyaremye is NRG-specialist meerfasenstromingen en werkt samen met TU-Eindhoven aan de computercode Briscola. Deze simulatiecode moet gaan helpen om het gedrag van bellen in koelwater te verklaren. En nog belangrijker: te voorspellen.

“Met meerdere fasen van materie bedoelen we dat er verschillende toestanden of vormen van materie tegelijkertijd aanwezig kunnen zijn in een systeem.”

In een watergekoelde reactor kan water dus als vloeistof én als gas aanwezig zijn. “Deze verschillende ‘fasen’ kunnen interacties aangaan en invloed hebben op de stroming en eigenschappen van het systeem als geheel.”

### Meer bellen, minder koeling

De relevantie van dit begrip wordt pas goed duidelijk als Habiyaremye aan de mogelijkheid van een kernsmelt refereert. “Als de temperatuur rond de kern te hoog oploopt, ontstaan er bellen in het koelmiddel. Daardoor neemt de koelcapaciteit van het koelmiddel af waardoor de temperatuur nog verder oploopt en er nog meer bellen ontstaan. Dat zou uiteindelijk kunnen leiden tot het smelten van de kern. En dat moet te allen tijde voorkomen worden.”

Het begrijpen van deze meerfasenstroming is dus essentieel voor het modelleren en voorspellen van complexe stromingsprocessen rond de kern in een reactor. Maar wát begrijpen we nu precies niet aan dit fenomeen? Daarvoor moeten we inzoomen.

Foto van een typische tweefasenstroming waarin bellen in allerlei vormen te vinden zijn



Vier snapshots uit een Briscola simulatie van een stijgende bel die zich vervormt. Dit soort vervormingen komen voor in de foto links.



### Victor Habiyaremye:

*Ontstaan er luchtbelletjes in het koelmiddel? Dan neemt de koelcapaciteit af.*



“Met Briscola kijken we héél gedetailleerd naar het ontstaan van één luchtbel in een turbulente stroming. Hoe gedraagt die bel zich? Breekt hij in de turbulentie op in twee middelgrote bellen of juist in vijf kleintjes? Hoe stuiten die dan vervolgens tegen elkaar en ontstaan er dan nieuwe belletjes? Een paar grotere bellen of nog meer kleintjes? En waarom gebeurt dat?” De Briscola-code is niet voor niets vernoemd naar het Italiaanse kaartspel waarin strategie en geluk hand in hand gaan. “Er kan namelijk van alles gebeuren. En wát er uiteindelijk gebeurt, is afhankelijk van een groot aantal parameters.”

### Simuleren goedkoper dan experimenteren

Vanwege het grote aantal parameters zoomt Briscola in op slechts een klein detail in de enorme reactor. “Voor één tot vijf luchtbelletjes is al enorm veel computerrekenkracht nodig. Dat was lang een hindernis. Gelukkig neemt de rekenkracht van computers snel toe waardoor deze simulaties nu mogelijk worden. Bovendien laten simulaties veel meer meetpunten toe dan een experiment. Met een detailsimulatie in Briscola kunnen we dus experimentele data aanvullen.” En hoewel computerrekenkracht erg duur is, is simuleren nog altijd goedkoper dan het uitvoeren van praktijkproeven. “In feite laten we de experimenten daarom niet in de werkelijkheid, maar in de computer plaatsvinden,” legt Habiyaremye uit. “In die digitale versie van de werkelijkheid kunnen we daarna alles wat er rond de bellen gebeurt zien en meten.

We leren hoe een bel opkomt en zich gedraagt in turbulentie. En daarmee leren we voorspellen wat er in werkelijkheid in de reactor gaat gebeuren.” Met andere woorden, met de numerieke code Briscola is de werkelijkheid tot in het allerkleinste detail nagebootst.

Briscola wordt door NRG ontwikkeld in de stijl van de veelgebruikte OpenFOAM code. “Ook Briscola zelf wordt open source. Verder is het de bedoeling dat alle leerervaring die vanuit Briscola ontstaat, wordt meegenomen in statistische modellen. Het idee is dat we leren van Briscola-detailsimulaties en met die kennis uitzoeken in grootschalige statistische simulaties die de nucleaire industrie gebruikt bij reactorontwerp,” aldus Victor Habiyaremye die hiermee wil promoveren bij TU-Eindhoven.

NRG presenteert in de zomer van 2024 Briscola op de internationale conferentie voor Numerieke Methoden voor Meerfasenstromingen. Er is grote belangstelling voor deze kennis en kunde. Als de nucleaire industrie het gedrag van kokend water beter kan voorspellen, draagt dat bij aan de veiligheid van watergekoelde kerncentrales. “Daarnaast zijn er ook nieuwe SMR-reactoren in ontwikkeling die gebruik maken van kokend water. Ook ontwikkelaars van deze kokendwaterreactoren hebben baat bij het begrijpen en kunnen voorspellen van meerfasenstromingen in hun reactorconcept.”

# Verbrost reactorvatstaal is thermisch te revitaliseren

*Kerncentrales stoten geen CO<sub>2</sub> uit. Daarom willen steeds meer landen hun bestaande kerncentrales langer in bedrijf houden. Tachtig jaar is geen uitzondering, mits de kwaliteit van het reactorvat dat toestaat. NRG toonde aan dat bestraald reactorvatstaal kan worden gerevitaliseerd door een warmtebehandeling. "Schade door neutronenstraling verdwijnt en het staal krijgt zijn oorspronkelijke taaigheid terug."*

Het reactorvat is het enige onderdeel van een kerncentrale dat vrijwel niet te vervangen is. Dus als het zijn taaigheid verliest en er vergrote kans op breuk ontstaat, moet de kerncentrale dicht. Tenzij het reactorvat te revitaliseren is. NRG-materiaalwetenschapper Murthy Kolluri is optimistisch. "Wij willen aantonen dat dat kan." En de belangen zijn groot. De kerncentrales in Europa produceerden in 2023 23% van alle elektriciteit in de EU en daarmee 40% van alle CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteit. Meer dan 80% van de reactoren is ouder dan 30 jaar. Om de bestaande capaciteit ook voor de komende decennia zeker te stellen is kennis omtrent de veroudering én het revitaliseren van reactorvatstaal cruciaal.

Kolluri heeft meer dan tien jaar onderzoek gedaan naar de invloed van stralingschade op reactorvatstaal uit een inmiddels gesloten Armeense kerncentrale. "We wilden eerst de invloed begrijpen van een hoge dosis neutronenstraling op de eigenschappen van reactorvatstaal. Daarna onderzochten we de effectiviteit van thermisch gloeien om het staal te herstellen van stralingschade."

## Herstel van neutronenschade

Kolluri: "Uit de literatuur was al bekend dat je de eigenschappen van gedegradeerd reactorvatstaal met hittebehandeling kunt revitaliseren." Experimenten bij NRG bevestigden dat de stralingschade in het Armeense staal grotendeels ongedaan wordt gemaakt na opwarming

tot een temperatuur van 475°C. "Het Armeense staal was bestraald tot een dosis die overeen komt met 300 jaar reactorbedrijf. Maar na de thermische behandeling kreeg het nagenoeg dezelfde conditie terug als voor de bestraling."

Nadat Kolluri dit aantoonde voor Armeense reactorvatstaalmonsters, wilde hij ook weten of dit zou lukken met reactorvatstaal van nieuwere generatie III-reactoren zoals westerse PWRs en Russische VVER-1000 reactoren. "Er zitten namelijk behoorlijke verschillen tussen oude en nieuwe soorten reactorvatstaal. Oude reactorvatstalen bevatten meer koper en fosfor dan de nieuwe staalsoorten die juist meer nikkel en mangaan bevatten." Daarom moest de thermische gloeitechnologie opnieuw worden bewezen voor reactorvaten van generatie III kerncentrales.

Er was echter één probleem: hoe toon je dat aan? "Daar is materiaalonderzoek voor nodig. En daarvoor zijn staalmonsters van nieuwere reactorvaten nodig die eveneens bestraald zijn met een hoge dosis. En die staalmonsters zijn zeldzaam."

NRG besloot in samenwerking met JRC zelf een reeks reactorvatstaalsoorten te laten vervaardigen die reactoren van generatie III vertegenwoordigen. "We stelden deze monsters bloot aan een hoge neutronendosis in de Hoge Flux Reactor en bootsten zo een belasting



**Murthy Kolluri:**

*Verhit je de nieuwere reactorstalen voor langere tijd tot een zeer hoge temperatuur, dan verdwijnt ook daarin de neutronenschade.*

na die het staal in de normale praktijk pas na tientallen jaren zou hebben ondergaan." Deze materialen zijn verder onderzocht in samenwerking met Europese partners in het 'STRUMAT-LTO' project.

Daarna toonde Kolluri met de Europese collega-onderzoekers aan dat het principe ook voor reactorvaten van generatie III kerncentrales werkt. "Verhit je de nieuwere reactorstalen voor langere tijd tot een zeer hoge temperatuur, dan verdwijnt ook daarin de neutronenschade." Dus ook het staal van nieuwe reactorvaten is te revitaliseren en krijgt zijn taaigheid terug na een thermische behandeling.

## Goed nieuws voor het klimaat!

Goed nieuws voor het klimaat dus, want we kunnen nu dus elk reactorvat in Europa weer als nieuw maken? Kolluri moet lachen: "Nou, we zijn er nog niet. We moeten nog heel veel aantonen. Eén van de kernvragen is: gedraagt gerevitaliseerd staal zich onder bedrijfsomstandigheden hetzelfde als het oorspronkelijke staal?" Met andere woorden: is een thermisch gerepareerd reactorvat net zo goed als het oorspronkelijke reactorvat? Murthy Kolluri is dus voorlopig nog niet klaar met zijn onderzoek. "Toch zijn de perspectieven goed: ook een kerncentrale met een gedegradeerd reactorvat kan na een thermische behandeling wellicht langer in bedrijf blijven."



# Betaalbare plastics vervangen klassieke materialen

Onderzoek in nucleaire laboratoria gaat gepaard met hoge stralingsvelden, hoge temperaturen en agressieve chemische stoffen. Om ingewikkelde bewerkingen handmatig of met robotarmen in hot cells uit te kunnen voeren, worden hulpmiddelen gebruikt. “Nu zijn die nog vaak van glas of roestvrijstaal. Duur en bewerkelijk. Het blijkt dat plastics uit de 3D-printer niet alleen goedkoper zijn, maar ook beter tegen de omstandigheden kunnen.” Dat zorgt binnenkort voor grotere flexibiliteit bij het maken van hulpmiddelen.

In de nucleaire sector gaat niemand over één nacht ijs. Dat weet radiochemicus Patrick Haaß als geen ander. Dus overstappen op 3D-geprinte laboratoriummaterialen vereist veel bewijslast en een lange adem. “Er wordt uitsluitend gewerkt met gecertificeerde materialen waarvan aangetoond is dat ze voldoende robuust zijn voor de condities bij nucleair onderzoek.”

In 2019 startte Haaß met de voorbereidingen voor zijn onderzoek. Vier jaar later (2023) is er zicht op een doorbraak. “3D-prints zijn nuttig,

ze hebben veel voordelen ten opzichte van bijvoorbeeld roestvrijstalen hulpmiddelen.” En heel verrassend: een vrij standaard en goedkoop materiaal komt als één van de beste uit zijn onderzoek. Maar voordat dit duidelijk werd, had Haaß al heel wat onderzoekuren achter de rug.

“Ik begon uiteraard met de selectie van een geschikte printer en de vaststelling welke materialen daarmee geprint kunnen worden.” Daarna selecteerde Patrick zes kansrijke plastics. “Eén heel gewone, eigenlijk bedoeld als referentie-

materiaal, en nog vijf andere geavanceerdere plastics.” Daarna begon een tijdrovend en zeer grondig onderzoek naar alle de eigenschappen van de kanshebbers.

## Vijf identieke monsters

“Van elk van de zes materialen maakte ik voor elke onderzoeksstap vijf identieke monsters.” Dat leverde uiteindelijk 1.110 monsters op. “Als je van elk materiaal vijf monsters op dezelfde manier test, maak je printfouten zichtbaar.” Immers: als je vier keer hetzelfde resultaat krijgt en de vijfde wijkt af, dan weet je dat daar een printfout in zit. “Dat monster deugt niet en valt af. Daarna werden de goede sets met elkaar vergeleken.”

Dat printen klinkt overigens eenvoudiger dan het is. “De vorm van de proefmonsters moest zodanig geprint worden dat de kans op de genoemde printfoutjes het kleinste is.” Daarvoor moest contact tussen monster en printbed op cruciale plekken minimaal zijn. Ook hebben de verschillende plastics kenmerkende nabewerkingsstappen nodig. “Denk aan chemisch wassen en uitharden met UV-licht.” Het bleek een monnikenwerk.

Alle zes de plastics werden per vijf monsters tegelijk (totaal dus meer dan duizend!) aan een groot aantal tests onderworpen. “Je moet dan denken aan blootstelling aan verschillende chemicaliën. Zuren en basen, laag en hoog geconcentreerd, vloeibaar en in gasvorm en verschillende tijdsduren.”

Na deze ‘mishandeling’ werden de monsters onderworpen aan een trekproef om te kijken hoe de plastics zich hadden gehouden. “Eén ding doorstonden ze allemaal: ze konden

## Patrick Haaß:

Voor de 3D-printer ligt er een mooie toekomst in het radiologisch laboratorium.



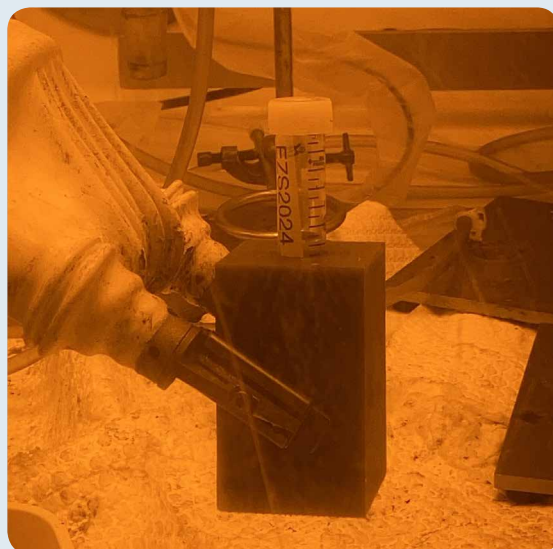
allemaal tegen een flinke dosis straling.” Op de chemische tests reageerden ze echter verschillend. “Dat bleek toen alle geteste monsters waren geanalyseerd en vergeleken.”

## Twee ‘winnaars’

Van de zes kunststoffen waren er twee die eruit sprongen. “Het ene is een plastic dat is versterkt met glas, het andere – verrassend genoeg – bleek het standaard plastic te zijn.” Dat was eigenlijk bedoeld als referentiemateriaal, maar bleek juist uitstekend bestand tegen de verschillende blootstellingen. “Ook qua kosten is deze uitkomst interessant. Het referentie-plastic kost nog geen 150 euro per liter, het glas-versterkte plastic meer dan het dubbele.”

De twee ‘winnaars’ vullen elkaar ook nog eens aan: het glas-versterkte plastic blijkt voor specifieke toepassingen de beste keuze omdat de print robuuster is en langer meegaat. “Voor het ‘snelle’ werk en eenmalige toepassing is het goedkopere plastic ideaal: snel te verwerken en het heeft na het printen minder nabewerking nodig,” constateert Patrick Haaß.

Hij denkt dus dat er voor de 3D-printer een mooie toekomst ligt in het laboratorium. “Kunststoffen zijn beter bestand tegen onze radiochemische processen en daarna makkelijker schoon te maken dan RVS. En als we ze toch moeten afvoeren, zijn kunststoffen makkelijk samen te persen. Als het volume radioactief afval kleiner is, dan bespaart dat opslagkosten.”



## Voorbeeld van een toepassing van 3D geprint hulpmiddelen in extreme omstandigheden

De grijze houder zorgt ervoor dat de buis tijdens het overbrengen van kleine hoeveelheden hoog-radioactieve vloeistof stabiel staat. In een Hot Cell is het hanteren van dergelijke buizen moeilijk, de grijze houder is maatwerk en gemakkelijk door een robotarm te hanteren.

In de hot cell wordt het materiaal blootgesteld aan een sterk stralingsveld waar het materiaal tegen moet kunnen. Ook bij direct contact met chemicaliën mag het materiaal niet stuk gaan of oplossen.

Experiment uit 1990:

# Onderzoek naar MOX-splijtstof snelle reactoren weer opgestart

Natuurkundige Sander van Til heeft bij NRG een draad opgepakt die enkele decennia geleden werd losgelaten. "Ik onderzoek een experiment met zogenaamde MOX-splijtstof, een mengsel van uranium- en plutoniumoxide voor snelle reactoren." Dat experiment werd vanaf 1990 in de HFR gedaan en is in 2005 gestopt. "Nu gesmolten zout en loodgekoelde snelle reactoren weer in de belangstelling staan, is ook dit splijtstofonderzoek weer actueel."

De hernieuwde belangstelling kan Van Til wel verklaren: "Een snelle reactor heeft een aantal specifieke voordelen ten opzichte van de 'gewone' watergekoelde reactor (zie kader)." Zo kan een snelle reactor bijvoorbeeld efficiënt gebruik maken van natuurlijk uranium, maar afhankelijk van de behoefte kun je een snelle reactor inrichten om meer nieuwe splijtstof in de vorm van plutonium te kweken (breeding) of juist overschotten aan plutonium te versplijten (burning). "Dat laatste is waar ik me in het

huidige project op concentreer: energiewinning uit plutonium met bijkomstig voordeel dat er minder langlevend radioactief afval overblijft." Al 15 jaar lang houdt NRG enkele bestraalde MOX-splijtstofpennen in opslag. "Ze bevatten pillen met 40 tot 45 procent plutonium." Heel bijzonder, want de MOX bevat normaliter 20 procent plutonium. "Deze pennen zijn speciaal gemaakt om te onderzoeken wat er gebeurt met de splijtstof als je het plutoniumgehalte opvoert voor de genoemde 'burning'-modus."

## 'Gewone' en 'snelle' reactoren

Als je een 'gewone' reactor vergelijkt met een 'gewone' brandstofmotor, dan is de snelle reactor een Formule 1 motor. Geavanceerdere technologie, geavanceerdere brandstoffen en betere prestaties.

### Gewone kernreactor:

- Gebruikt langzame (afgeremde) neutronen;
- Moderator/koelmiddel water vertraagt de neutronen;
- Brandstof: verrijkt uranium (4% U-235) en/of kleine hoeveelheden plutonium;
- Efficiëntie: ligt lager, alleen U-235 (en soms Pu-239) van de brandstof wordt verbruikt. Langlevende Pu-isotopen (Pu-242, PU-244) worden niet verspleten;
- De hoeveelheid radioactief afval is (relatief) groot en straalt langdurig.

### Snelle reactor:

- Gebruikt snelle neutronen, zonder vertraging door een moderator;
- Het koelmiddel, b.v. natrium of lood gedraagt zich niet als moderator. Beide zijn namelijk 'onzichtbaar' voor neutronen;
- Brandstof: uranium (U-235 en U-238), plutonium (alle Pu-isotopen) of thorium;

- Naar schatting kun je met een snelle reactor ongeveer 20 keer zoveel energie uit uranium halen dan met een gewone kernreactor;
- Gebruikte splijtstof van andere reactoren kan worden gebruikt als splijtstof voor een snelle reactor. Hierbij kan langlevend radioactief afval omgezet worden in korter levend radioactief afval. De hoeveelheid langlevend radioactief afval kan dus verminderd worden;
- Een aantal ongevalsscenario's die zich kunnen voordoen in watergekoelde reactoren kunnen niet voorkomen in metaalgekoelde reactoren. Het koelmiddel stroomt bij lage druk en kan vele malen meer warmte opnemen zonder te gaan koken (ook onder ongevalsomstandigheden). Ook waterstofvorming is daar niet mogelijk.

Vanwege alle voordelen wordt er inmiddels weer hard gewerkt aan snelle reactoren met metaalkoeling. Er is nog veel onderzoek nodig voor ze op de markt zullen komen. Als we flink inzetten op onderzoek zou dat zo rond 2050 kunnen gebeuren. De technologie van een snelle reactor werkt en is bewezen. Er hebben al meer dan twintig test en demonstratiereactoren van dit type verspreid over de hele wereld gedraaid. Onderzoek is met name nodig om dit soort reactoren met de bijbehorende splijtstofcyclus economisch rendabel te maken en verbetering van veiligheidsaspecten is uiteraard een continu proces.



### Sander van Til:

Een snelle reactor heeft een aantal specifieke voordelen ten opzichte van de 'gewone' reactor.

## Plutonium voorraad opmaken

Zo rond 1990 werd er een Europees programma ontwikkeld om de in het verleden opgebouwde plutoniumvoorraden in de splijtstofcyclus te verwerken. "Als je in MOX het percentage plutonium sterk zou kunnen verhogen, zou je deze voorraden als splijtstof kunnen versplijten." Daarmee kon de wereld zijn plutoniumvoorraad dus verminderen door er energie mee op te wekken. "Omdat plutonium een belangrijk onderdeel is van het langdurend radioactief afval, verklein je hiermee ook dat probleem. Een 'win-win situatie'."

Diverse MOX-pennen werden vanaf de jaren 90 bestraald in de HFR om de praktijkomstandigheden in een snelle reactor na te bootsen. In 2005 werden de bestralingen afgerond en de pennen opgeslagen. "Omdat de belangstelling (en financiering) voor kernenergie dipte, werd het onderzoek gestaakt, nog voordat de splijtstof onderzocht kon worden."

Twintig jaar later pakt Van Til de draad op met de demontage van de splijtstofpennen in het laboratorium. "We hebben de bestraalde splijtstof nauwgezet onderzocht en zagen dat de temperatuurverdeling in de MOX-pillen asymmetrisch is geweest." Om zoveel plutonium in een splijtstofpillen kwijt te kunnen, moet het ontwerp van de pillen aangepast worden. Door deze aanpassingen, werd ze gevoelig voor kleine ruimtelijke variaties. "De ene kant van de splijtstofpil werd heter dan de andere kant. En door die asymmetrische temperatuur-

verdeling ontstaan ongelijke veranderingen in de microstructuur van het splijtstoftablet."

## Voorspelbaar gedrag

Volgens Van Til zijn de veranderingen op zich geen probleem, maar het is wel nodig dat ze bekend en voorspelbaar zijn. "Het temperatuurgedrag van splijtstof moet te allen tijde betrouwbaar zijn. Je moet dus goed begrijpen wat er in de splijtstof gebeurt om een goed voorspelbaar en veilig proces ontwikkelen."

Van Til schetst de uitdaging: "Deze MOX-splijtstoftabletten bereikten een inwendige temperatuur van 2.300°C. Dat is niet ongevoel voor snelle reactorsplijtstof. Maar omdat bij deze temperaturen de splijtstof verandert en daarmee de vermogensverdeling, wil je dat dat volledig voorspelbaar gebeurt. We willen daarom alle effecten exact weten en begrijpen. Hoe voorspelbaar is dit gedrag? Kun je het beïnvloeden? Je wilt geen onregelmatige 'hete' en 'koude' plekken."

Het is een puzzel waar Van Til nog wel even mee bezig is. "Eigenlijk was de pauze van 20 jaar ook weer een voordeel. De rekenkracht van de computers is intussen sterk toegenomen. We kunnen nu de bestralingscondities in de splijtstof in meer detail narekenen."

Inmiddels onderzoekt NRG hoe de HFR net als dertig jaar geleden kan bijdragen aan kwalificatie van nieuwe splijtstoffen. "Dit is opnieuw interessant gezien het groeiend aantal nieuwe, snelle (SMR) reactorontwerpen."



# NRG ontwikkelt sorteermethode voor vrijgave van laagactief afval

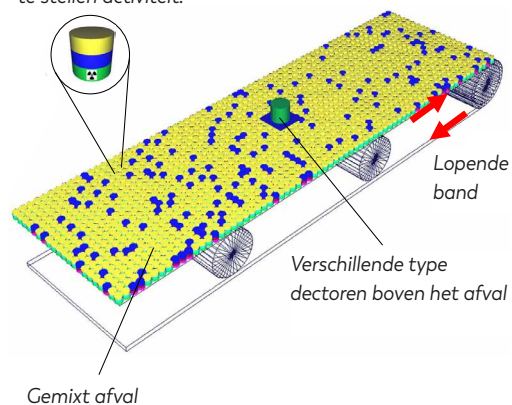
Hoe weet je zeker dat laagradioactief afval bijna is 'uitgestraald' en mag worden vrijgegeven? NRG werkt aan een opstelling met detectoren die heel precies meten of afval uit de nucleaire industrie wettelijk klaar is om gerecycled te worden.

Radioactiviteit neemt af naarmate de tijd vordert. "Dat komt door natuurlijk verval, uitgedrukt in halfwaardetijden. De tijd die een stof nodig heeft om de helft van zijn straling kwijt te raken," legt Sander Nievaart uit (afval)-

deskundige bij NRG. "Ook laagradioactief afval gaat dus steeds minder stralen. Tot de straling zo laag is dat je het 'gewoon' afval kunt noemen." Voor constructiematerialen van nucleaire installaties is dat meestal na dertig jaar.

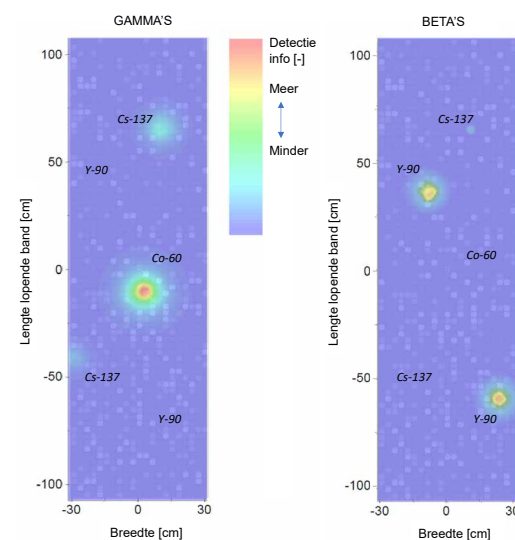
## Set-up van simulatie

Uitvergroting van een 'afval-volume' met verschillende materialen en in te stellen activiteit.



## Resultaat

De simulatie toont de locatie van vijf radioactieve bronnen op de lopende band tussen het gemixte afval.



## Sander Nievaart:

Recyclen gebeurt nu al op grote schaal met beton en staal uit Duitse kerncentrales.



De wet bepaalt wanneer een stof niet meer radioactief genoemd hoeft te worden. Je hoeft dan geen speciale (dure) maatregelen meer te nemen om dit afval te isoleren. Je kunt het dan bijvoorbeeld recyclen.

## Duits staal en beton

Recyclen gebeurt nu al op grote schaal met beton en staal uit Duitse kerncentrales die momenteel worden afgebroken. Dit zijn bekende gelijksoortige afvalstromen en zijn dus relatief makkelijk te scheiden in radioactieve en niet-radioactieve fracties.

"Maar wat als er van alles door elkaar ligt?" vroeg Nievaart zich af. Er ligt namelijk veel van dit soort ongesorteerd laag radioactieve afval opgeslagen in de wereld. Denk aan gebruikte beschermende kleding, kunststof verpakkingsmaterialen, gereedschappen of laboratoriummonsters. "Dit wordt enkele tientallen jaren in opslag gehouden."

Uiteraard wil je er daarna wel zeker van zijn dat het onder de vrijgave grens zit. Daarom werkt Nievaart sinds 2021 aan de ontwikkeling van een afvalscheidingsmethode die hij inmiddels nauwgezet in de computer heeft gesimuleerd.

## Virtuele detectoren

"We hebben een lopende band nagebootst met daarop allerlei stoffen. Sommige geven een beetje gamma of bèta straling af, andere stoffen stralen niet. Daarboven hangen virtueel

alle stralingsdetectoren die we kennen. Als we de band dan starten kunnen we zien wat die detectoren met hun eigen specificaties onder verschillende omstandigheden allemaal meten."

Omdat de radioactiviteit zo laag is, moet Nievaart ook rekening houden met 'ruis', afscherming en de natuurlijke achtergrondstraling. "Dat belemmert het 'zicht' van de detectoren op laag stralend afval." Toch was de simulatie succesvol waarna ook veelbelovende praktijktests volgden met echte detectoren en echt actief materiaal.

## Twee 'afvalers'

Nievaart schat in dat er binnen een jaar of vier een demonstratieversie van zijn 'afvalscheidingsmachine' gemaakt kan worden. Een lopende band met bij-wijze-van-spreken twee 'afvalers' aan het einde: eentje die vrijgegeven kan worden en eentje die nog een poosje opgeborgen moet worden.

"Er is ook Europese belangstelling voor deze NRG-techniek. De ontwikkeling is daarom ingebracht in het EURAD-2 programma," aldus Nievaart.

# Veilige werkwijzen rond therapeutische isotopen met alfaverval



**Ellis Winters:**

Met 'veilig' bedoelen we veilig voor de patiënt én voor de behandelaar.

*Kankertherapie wordt steeds preciezer en persoonlijker. Innovatieve isotopen met alfaverval, zoals lood-212 en actinium-225, maken behandeling mogelijk die is toegesneden op de individuele patiënt. "Alfastralers hebben grotere voordelen ten opzichte van de al langer toegepaste gamma- en bètastralers. Maar ze hebben ook andere karakteristieken." En die zijn van invloed op de werkwijzen in de productieketen van de nucleaire medicijnen.*

Ellis Winters is technisch geneeskundige en bij NRC werkzaam als consultant stralingsbescherming. Zij draagt bij aan het Europese SECURE-project dat zich richt op het versterken van de Europese werkwijzen bij de productie en toepassing van innovatieve medische radio-isotopen. "Alle stappen rond innovatieve medische isotopen moeten veilig zijn. Vanaf de productie, via de behandeling in het ziekenhuis tot aan de omgang met de reststoffen."

Met 'veilig' bedoelen we veilig voor patiënt én de behandelaar. "Maar ook voor de operator die ze maakt in de reactor of de versneller. En ook voor de radio-farmaceutische medewerker die ze verwerkt, de chauffeur die ze naar het ziekenhuis brengt en de medewerker die de spuiten klaar maakt." En uiteraard ook voor de personen in de 'back-end' die moeten voorkomen dat radioactieve reststoffen in het milieu terechtkomen.

## 'Alfatherapie'

De nucleaire geneeskunde evolueert zich steeds verder in de richting van het gebruik van wat we (voor het gemak) 'alfastralers' noemen. "Er zijn inmiddels veelbelovende therapieën rondom deze isotopen ontstaan. We noemen ze ook wel TAT-isotopen: Targeted Alpha Therapy."

Klassieke gamma en bètastralers hebben een veel sterker penetrerend vermogen en veroorzaken ook schade op plekken waar je dat

niet wil. "Het grote voordeel van isotopen met alfaverval is het hele specifieke, lokale stralingsveld. De alfa-energie straalt vooral op de plek waar het op dat moment is."

Het lukt inmiddels om een TAT-isotoop precies in een (uitgezaaide) tumor te krijgen. "Daar bestraalt hij wel de kwaadaardige cellen, maar niet het gezonde weefsel eromheen." Daarom is deze therapie zo interessant: je beperkt de nevenschade. "Bovendien kun je heel persoonsgericht werken. De therapie wordt afgestemd op de soort en grootte van de tumor."

Uiteraard moeten werkwijzen in de gehele radio-farmaceutische keten worden aangepast op deze nieuwe ontwikkelingen. "Nu bevindt deze vorm van behandeling zich nog in de onderzoeksfase. Je praat over tientallen patiënten." De resultaten zijn gelukkig zó positief, dat opschaling al in de nabije toekomst wordt verwacht. "Dus moet de hele sector zich nu al gaan voorbereiden op massaproductie, meer transport en veelvuldig gebruik van isotopen met een alfaverval op de ziekenhuiswerkvloer." Door de verwachte groei zullen dus steeds meer professionals ermee in aanraking komen.

## Groot en zwaar

Alfastraling wordt over het algemeen gezien als 'makkelijk hanteerbaar'. "Alfadeeltjes zijn relatief groot en zwaar. Ze dringen niet heel diep door in materialen." Je kunt ze, bij wijze van spreken,

al tegenhouden met plasticfolie of papier. "Maar krijg je ze per ongeluk binnen door inhaleren of inslikken, dan kunnen ze wel degelijk grote schade aanrichten. Bijvoorbeeld in de longen." Met andere woorden: nucleaire medicijnen zijn, net als 'gewone' medicijnen, wel schadelijk bij verkeerd gebruik. Ook vervallen deze isotopen naar andere (stralende) stoffen. "Zo vervalft radium naar het edelgas radon dat zich gemakkelijk door de lucht verplaatst. Bij inademing kun je ziek worden."

Wie met deze stoffen werkt, moet dus beslist oppassen. "SECURE leidt tot aanbevelingen voor het veilig produceren, benutten en afvoeren van zowel deze isotopen als hun dochterproducten," verzekert Ellis Winters. "We brengen in kaart waar problemen of risico's kunnen ontstaan en welke maatregelen er genomen kunnen worden."

SECURE is nu halverwege de looptijd en gaat nog door in 2025. "Uiteindelijk leveren we een praktisch rapport op dat alle betrokkenen in de ketenen informeert over de eventuele blootstellingsrisico's rond TAT-isotopen bij de fabricage, gebruik, opslag en transport." Er komen praktische aanbevelingen voor het gebruik van beschermende kleding of speciale apparatuur bij het hanteren van TAT-isotopen. "Daarnaast zal het project belangrijke lessen opleveren over het opschalen van de productie van de isotopen met alfaverval," aldus Winters.



# Ervaring NRG essentieel voor Nederlandse nucleaire nieuwbouwplannen

De Nederlandse regering bereidt de bouw van twee nieuwe kerncentrales voor. De Tweede Kamer wil er zelfs vier. Een aantal provincies heeft het oog laten vallen op de kleinere modellen: Small Modular Reactors (SMRs). De voorbereiding en de bouw zal groot beslag leggen op bestaande ervaring. “Wij hebben in Nederland ervaring met het bedienen van kernreactoren en doen met het PALLAS project ervaring op met het bouwen van een nieuwe reactor. In het nieuwe NRG-team New Build, bundelen we deze kennis en ervaring.

Marieke van Gemert kent de operationele wereld van de kerncentrale. Na diverse detacheringen op de werkvloer van meerdere kerncentrales in de EU voor (vergunning)technische ondersteuning bij modificaties, bedrijfsduurverlenging en ontmanteling, gaat zij zich richten op nieuwbouw in Nederland.

## Internationale belangstelling

“Ik merk dat de vraag naar onze expertise aan het toenemen is. Diverse internationale leveranciers van kerncentrales kloppen bij ons aan voor

kennis over de typische Nederlandse nucleaire situatie.” Daarnaast hebben ook het Rijk, provincies en zelfs gemeenten behoefte aan kennis. “Wat zijn de voor- en nadelen van verschillende reactortypen. Welke zijn kansrijk binnen Europese en Nederlandse wet- en regelgeving? Hoe zit het met koelwater of andere inpassingsvraagstukken?”

Van Gemert kan de belangstelling voor NRG wel verklaren. “Wij kennen de Nederlandse én internationale wet- en regelgeving natuurlijk

## Kerncentrale Borssele

De Zeeuwse plaats is de voorkeurslocatie van de Nederlandse regering voor de bouw van twee nieuwe kerncentrales. Onderzocht wordt of de bestaande kerncentrale langer in bedrijf kan blijven.



## Marieke van Gemert:

Diverse internationale leveranciers van kerncentrales kloppen bij ons aan voor kennis over de typische Nederlandse nucleaire situatie.



door en door. En het mooie is: NRG kan praktische kennis combineren met strategische perspectieven. Wij kennen de praktijk, de industrie én de ontwikkelingen bij de vergunningverlenende en toezichthoudende overheden.”

Daarom heeft NRG in 2023 besloten om alle praktische nieuwbouwkennis samen te brengen in het nieuwe team New Build.

## Industrie én overheid

Vooral de industrie klopt op dit moment aan bij NRG met praktische vragen over typische Nederlandse risico's en issues die een rol spelen bij nieuwbouw. “De manier waarop wij in Nederland omgaan met hoogradioactief afval is bijvoorbeeld anders dan in andere landen.” Hier wordt het afval ‘met finale kwijting’ overgedragen aan COVRA die de verantwoordelijkheid van de afvalproducent overneemt. “Daar hangen wel, naast het prijskaartje, de strenge acceptatie-eisen van COVRA aan. Je wil namelijk vooraf weten wat je moet doen om dit afval bij COVRA geaccepteerd te krijgen.” Nog een voorbeeld: “Welke eisen stelt Tennet als je 1.500 MegaWatt aan het elektriciteitsnet wil schakelen? Daar moet je al vóór de bouw rekening mee houden, anders kan de centrale zijn stroom niet kwijt.”

Overheden hebben op dit moment volgens Van Gemert vooral nog conceptuele vragen over nieuwe kerncentrales. “Welke reactoren

zijn kansrijk? Kun je je voorbereiden op de komst van thoriumreactoren?” Naarmate de bouw dichterbij komt, zullen ook overheden behoefte krijgen aan praktische kennis en kunde. “Wij hebben inmiddels ruime ervaring opgedaan met de voorbereiding van de bouw van de PALLAS reactor in Petten. Tegen de tijd dat PALLAS in bedrijf komt, begint de bouw van de eerste nieuwe kerncentrale. De beschikbaarheid van ervaren mensen maakt NRG daarom extra interessant.”

## Grote of kleine reactoren: het proces is ongeveer gelijk

De nieuwe PALLAS-reactor heeft ongeveer de omvang van een Small Modular Reactor. Toch, zo benadrukt van Gemert, maakt klein of groot eigenlijk niet uit. “De procedures en vergunningstrajecten lijken sterk op elkaar.” Dus de kennis en ervaring die met de voorbereiding en de bouw van de PALLAS-reactor wordt opgedaan, kunnen zo worden opgeschaald naar grote nucleaire initiatieven, verzekert Van Gemert.

# Kernenergie en waterstofproductie

*De samenleving heeft hoge verwachtingen van de waterstofeconomie. Kerncentrales zouden daar in principe een grote rol in kunnen spelen. Er loopt een meerjarige Europees onderzoek naar de levensvatbaarheid van geïntegreerde productie van elektriciteit en waterstof met kernenergie. “Technisch kan het, economische aspecten bepalen of het gebeurt.”*

Er is heel veel vraag naar klimaatneutrale stroom en er wordt volop ingezet op wind en zon. Helaas is de beschikbaarheid daarvan erg afhankelijk van weer, seizoenen en tijdstip (dag of nacht). Kernenergie is steeds meer in beeld als toevoeging voor de dal-momenten. “Als de vraag naar elektriciteit groot is, kan een kerncentrale bijspringen. Voor piekmomenten met overschotten aan elektriciteit wordt gekeken naar de mogelijkheid de overschotten te gebruiken voor waterstofproductie.”



Jan Meulenbrugge is NRG-expert op het gebied van veiligheid en vergunningen. Hij werkt mee aan het Horizon Europe project NPHyCo. Dat is een studie waarin acht landen bekijken hoe kansrijk de integratie van kernenergie met waterstofproductie is.

“In principe kun je eenvoudig met de stroom uit een kerncentrale waterstof produceren. Het NPHyCO project kijkt echter of verdergaande integratie van waterstofproductie met een kerncentrale interessant is. Loont het om naast de elektriciteit bijvoorbeeld ook stoom, koel- of proceswater te delen? En wat zijn daarvan de voor- en nadelen?”  
Er is grote interesse in deze combinatie omdat waterstofproductie om meerdere redenen interessant is. “Je kunt er overschotten aan

stroom in opslaan voor later gebruik. Daarnaast is waterstof een schone transportbrandstof voor bijvoorbeeld bussen en vrachtauto's. En het is een belangrijke grondstof voor de chemische industrie.”

### Het kán technisch

Dat waterstofproductie met kernenergie kán, staat vast. Het hóe moet worden uitgezocht. “Ga je een kerncentrale integreren met een waterstoffabriek? Of houd je ze gescheiden? Welke systemen ga je dan delen? Hoe sla je de geproduceerde waterstof op en hoe ga je deze energiedrager transporteren? Wat zijn veilige afstanden tussen de waterstofopslag en een kerncentrale?”

Het onderzoek is opgesplitst in drie hoofddelen: technische, economische en vergunningsaspecten. “NRG is met name met dat laatste aspect bezig.”

Meulenbrugge: “Technisch kun je voordelen bereiken met integratie. Je hebt voor allebei super schoon proceswater nodig, koelwater, hoge temperatuur stoom en procesbesturings-systemen. Die installaties kun je dus combineren.”

Qua veiligheid zijn er weer nadelen. “Productie en opslag van waterstof in of naast een kerncentrale moet uiteraard bewezen veilig zijn. Anders moet je het niet doen. En gedeelde systemen leveren mogelijk weer nieuwe risico's op.”



**Jan Meulenbrugge:**

*Ga je een kerncentrale integreren met een waterstoffabriek? Of houd je ze gescheiden?*

### Maar loont het economisch?

Er zijn wat algemene nadelen van waterstofproductie zelf. “Om waterstof te maken (en weer te gebruiken) gaat veel energie verloren. Of je daarvoor nu wind, zon, aardgas of kernenergie gebruikt, je hebt altijd grote conversieverliezen. “Waterstof is gewoon geen efficiënte ‘batterij’. Dat betekent ook economisch iets.”

Een deal breaker voor koppeling van waterstofproductie zouden daarom de economische aspecten kunnen zijn. “Hoewel er nog geen conclusies zijn, zien we al dat kosten van volledige integratie hoog kunnen zijn. Dat komt door de nucleaire veiligheid en alle vergunningseisen. In combinatie met lage efficiency van waterstofproductie is het dan de vraag of het loont.”

Er wordt daarom ook een vergelijking gemaakt met ‘load following’. In dat geval staat de waterstoffabriek op afstand van een kerncentrale. Hij wordt alleen ‘aangezet’ als de vraag naar waterstof voldoende groot is in combinatie met een lage stroomprijs. Flexibeler en goedkoper. “Het is eigenlijk zuiver financieel. Technisch kan alles.

Maar als het ‘beetje’ financiële winst van extra waterstof niet opweegt tegen de investeringen, gebeurt het niet.”

### En mag het vergunning technisch?

“Ja het mag, daar ziet het wel naar uit.” Vanzelfsprekend is de combinatie kernenergie/waterstof niet. “Zolang aangetoond kan worden dat de combinatie veilig is, is koppeling in principe mogelijk.” Dat betekent wel dat er eisen gesteld worden aan de waterstoffabriek, aan de waterstofopslag, het transport en welke veilige afstanden moeten worden aangenomen. Een oplossing is wellicht ook hier een scheiding: productie en opslag van waterstof op afstand van de kerncentrale.

“Technisch en qua vergunningen is er veel mogelijk. Maar voor de ideale oplossing zijn de kosten en baten allesbepalend,” aldus Meulenbrugge. Op definitieve conclusies hoe je het best waterstofproductie aan een kerncentrale kunt koppelen, moeten we nog even wachten. Het onderzoek loopt door tot begin 2025, vooral omdat toegang krijgen tot betrouwbare data veel tijd vergt.



# Nuclear Academy: studenten zijn de 'workforce' van morgen

*Nederland heeft grote ambities met 'nucleair'. Voor de nucleaire geneeskunde wordt de PALLAS-reactor gebouwd. In het hoofdlijnenakkoord van mei 2024 wordt gepleit voor de bouw van vier kerncentrales in plaats van twee. "Dat vraagt ook om grote investeringen in ons onderwijs." Nucleair talent is immers nu al schaars.*

"Het wetenschappelijke onderwijs aan de Nederlandse universiteiten op het gebied van nucleaire technologie is van hoog niveau en sluit goed aan bij de huidige nucleaire sector. Maar realisatie van alle plannen en ambities en het vervolgens bedrijven van de nieuwe centrales vraagt om een krachtige uitbreiding van de opleidingscapaciteit", zo vat natuurkundige Robert Beekveldt van NRG de essentie samen van de onderzoeksrapporten van Technopolis en Berenschot die de vereniging Nucleair Nederland en de overheid lieten opstellen. "Er zal heel veel nieuwe technische werkgelegenheid ontstaan. Nog los van de spin-off die loskomt voor bijvoorbeeld de maakindustrie in Nederland."

Dat er nu weinig tot geen MBO/HBO nucleair onderwijs is, vinden de overheidsonderzoekers een serieus punt van aandacht. "Juist MBO'ers en HBO'ers vormen de bulk van de benodigde nucleaire workforce. Er moet daarom NU gestart worden met nucleair onderwijs-ontwikkeling." En dat 'NU' in kapitalen is hoe de onderzoekers het ook letterlijk opschreven.

## **Onbekend maakt onbemind**

We moeten dus investeren in kennis en kunde. "Gelukkig heeft de Tweede Kamer via amendement Erkens-Dassen om versterking van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland gevraagd. Daarvoor is nu ook structureel geld beschikbaar." NRG en de TU Delft hebben het initiatief genomen tot de vorming van de

Nuclear Academy. De Nuclear Academy stelt zich onder andere ten doel leerlingen en studenten enthousiast te maken voor nucleair onderwijs en onderzoek en samen met de onderwijsinstellingen nucleaire curricula te ontwikkelen.

"Het is toch een beetje 'onbekend maakt onbemind'", weet Beekveldt inmiddels. "Zowel leerlingen als docenten zijn nauwelijks bekend met de nucleaire sector." Logisch dus dat ze verrast zijn over wat de sector aan interessante banen carrièrekansen te bieden heeft. "Ik ontdekte bijvoorbeeld dat MBO-scholen het idee hebben dat er in de nucleaire sector vooral wetenschappelijke medewerkers in computers zitten te staren. Terwijl de sector ook goed uitgeruste werkplaatsen hebben met uitstekende vakvrouwen en -mannen die instrumenten maken en onderdelen repareren." Dus draai- en freesbanken. En ook robotica vanwege het werken met radioactieve of stralende materialen. "En dat is waar nucleair onderwijs om de hoek komt kijken. Je moet daar ook als machinebankwerker specifiek voor opgeleid worden."

## **MBO enthousiast de verkenningsfase in**

Om het onderwijs 'warm' te maken, richt de Nuclear Academy zich eerst op de provincies die al een grote nucleaire werkgever hebben. Dus Overijssel, Zeeland en Noord-Holland. Er zijn ook al intentieverklaringen getekend tussen de Nuclear Academy, nucleaire bedrijven en meerdere MBO's (ROC van Twente, Scalda,



**Robert Beekveldt:**

*Ook de overheid zelf heeft behoefte aan nucleaire kennis.*

Vonk en Horizon). "De afspraken gaan over lesmodules, stage en projectenprogramma's en beroepsoriëntatie via gastlessen en excursies." Deze aanpak werkt. "MBO-docenten en studenten worden enthousiast vanaf het moment dat zij onze bedrijven van binnen zien."

De Nuclear Academy richt zijn aandacht ook op HBO-scholen. "We merken dat de aansluiting van 'nucleair' daar inmiddels ook van de grond komt." Het enthousiasme neemt toe als Beekveldt uitlegt dat kernenergie naast duurzame bronnen een belangrijke rol gaat spelen in de energietransitie. "En zeker als bekend is wat nucleaire technologie betekent voor de geneeskunde groeit de belangstelling snel."

Beekveldt constateert dat het snel kan gaan. "Hogeschool Zeeland en het Zeeuwse Scalda beroepsonderwijs zijn al bezig met het opzetten van lesprogramma's. Het MBO komt met een keuzedeel, het HBO start met een nucleaire minor." De Nuclear Academy helpt hieraan mee.

## **Overheid in de schoolbank**

"Ook de overheid zelf heeft behoefte aan nucleaire kennis." De kennishonger van politici en ambtenaren bij het Rijk, de provincies en zelfs bij gemeenten en veiligheidsregio's is daardoor enorm. "En die honger moet op de een of andere manier worden gestild," weet Robert Beekveldt. "Dat gebeurt vanuit de Nuclear Academy door voorlichting, technische duiding of maatwerk te leveren. Dat kan per provincie of departement verschillen."

**Nuclear. For Life.**



[www.nrg.eu](http://www.nrg.eu)