



Onderzoeksjaarverslag NRG 2021

Nucleaire professionals aan het woord



Nuclear. For life.



Inhoud

| | |
|---|----|
| Voorwoord – Geert-Jan de Haas | 4 |
| NRG start onderzoek naar ongevalsbestendige splijtstof – Mark Huntelaar | 6 |
| NRG draagt bij met Multi-Physics en Multi-Scale Computing – Christian Fedon | 8 |
| Voorspellen én herstellen degradatie reactorvatstaal – Murthy Kolluri | 10 |
| Internationale stand van zaken rond het afbreken van nucleaire installaties – Jaap Hart | 12 |
| Kerncentrales goedkoper, eerder en sneller bouwen door harmonisatie en standaardisatie – Bart Henstra | 14 |
| Stabiliteit van radioactief afval – Ronald Middelkoop | 16 |
| Jong geleerd, oud gedaan – Grigori Giannakoudakis | 18 |
| PSA-3 methode aangepast – Jacques Grupa | 20 |
| Rekenen aan de levensduur van bouten in een reactorvat – Peter Baas | 22 |
| Materiaalonderzoek Molten Salt Reactor – Kiki Naziris | 24 |
| Wat zijn de risico's van lozing radioactief koelwater Fukushima? – Govert de With | 26 |
| Benchmark Computercode voor Hoge Temperatuur Reactor – Fajar Pangukir | 28 |
| Het onzichtbare zichtbaar – Akshat Mathur | 30 |
| Stagiaires en afstudeerders bij NRG | 34 |

Afbeelding cover: zie pagina 6

NRG, juli 2022

NRG is een internationaal opererende nucleaire dienstverlener. 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 de autoriteit op het gebied van integrale stralingsbescherming. NRG exploiteert de Hoge Flux Reactor die eigendom is van de Europese Unie. Bij de onderneming werken ongeveer 700 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:

De nucleaire wereld is volop in beweging

Met heel veel plezier presenteer ik hierbij het jaarverslag van het NRG onderzoeksprogramma over 2021. Kijkend door een nucleaire bril, kun je spreken van een bijzonder jaar: bijna 50 jaar na de ingebruikname van de kerncentrale in Borssele presenteerden de beoogde coalitiepartijen in december een regeerakkoord met daarin het voornemen tot de bouw van twee nieuwe kerncentrales.

De nieuwbouw vormt onderdeel van het beleid van de overheid om in 2050 een CO₂-vrije energievoorziening gerealiseerd te hebben. Daarnaast wordt ingezet op het langer openhouden van de kerncentrale van Borssele na 2033. Met deze plannen zal kernenergie vanaf het midden van de jaren '30 een significante bijdrage leveren aan de productie van CO₂-vrije energie in Nederland.

Ook in andere landen wordt steeds nadrukkelijker gesproken en ook daadwerkelijk gewerkt aan uitbreiding van kernenergie. Inderdaad: het kost nu nog meer tijd en geld dan oorspronkelijk voorzien. Maar er wordt weer ervaring opgedaan, de industrie raakt steeds beter voorbereid en daarmee is de verwachting van kortere bouw tijden en lagere kosten gerechtvaardigd. Tot voorkort lag de nadruk op de bouw van grote lichtwaterreactoren (tot 1600 MW elektrisch vermogen, 3 keer zoveel als de kerncentrale Borssele) maar er is ook in toenemende mate interesse in de ontwikkeling en bouw van Small Modular Reactors. Het gaat hier om een nieuwe categorie reactoren waarvan de verwachting is dat ze tegen lagere investeringskosten bij kunnen dragen aan de energietransitie van bijvoorbeeld de energie-intensieve industrie. En dan hebben we het nog niet gehad over de mogelijkheid van productie van waterstof

met door kerncentrales opgewekte elektriciteit en/of warmte. Kortom: de nucleaire wereld is volop in beweging.

Deze beweging komt voort uit de groeiende overtuiging dat de samenleving een CO₂-vrije technologie als kernenergie niet bij voorbaat moet uitsluiten. Linksom of rechtsom, er is behoefte aan schoon en regelbaar vermogen om het energiesysteem te laten functioneren. Als bewezen en betrouwbare technologie kan kernenergie bijdragen aan de elektrificatie van fossiel-aangedreven processen in de industrie en vervoersector. Het zorgt ook voor meer autonomie en verbreding van de energieportfolio; de recente geopolitieke ontwikkelingen laten zien hoe belangrijk deze aspecten zijn. Recent heeft de Europese Commissie, op basis van een wetenschappelijke studie, het besluit genomen om kernenergie op te nemen in haar taxonomie waarmee kernenergie, onder voorwaarden, een duurzaam label krijgt waardoor het financieel aantrekkelijk wordt om te investeren in de bouw van nieuwe kerncentrales.

Het ontwikkelen en veilig en betrouwbaar opereren van een kerncentrale en andere nucleaire faciliteiten vraagt steeds weer om nieuwe kennis en expertise. Het NRG onderzoeksprogramma is al decennia een belangrijk



Geert-Jan de Haas:

“ Er is behoefte aan schoon en regelbaar vermogen om het energiesysteem te laten functioneren. ”

element van de Nederlandse nucleaire kennisbasis. Met het huidige meerjarig PIONIER programma (2021-2024) wordt op verschillende terreinen nieuwe kennis opgebouwd, getoetst en gedeeld met de omgeving, binnen en buiten de grenzen. De plannen voor nieuwbouw betekenen een nieuwe impuls voor het onderzoek. Samen met de nucleaire sector wordt momenteel gesproken over een nieuwe onderzoeks- en kennisagenda om de nieuwbouw te kunnen faciliteren.

Daarbij wordt ook goed gekeken naar de opvolger van de Hoge Flux Reactor (HFR), de PALLAS reactor. De HFR heeft de afgelopen decennia een grote rol gespeeld bij de ontwikkeling van kernenergie. Met de plannen voor nieuwbouw in het achterhoofd wordt er hard gewerkt om er voor te zorgen dat de PALLAS reactor na 2030 het stokje van de HFR kan overnemen. Samen met andere nieuwe onderzoeksreactoren in Frankrijk en België zal PALLAS na 2030 de ruggengraat vormen de Europese nucleaire infrastructuur.

Naast de nucleair technische onderzoeken is er in PIONIER aandacht voor het in kaart brengen van de rol en bijdrage van kernenergie in een energiesysteem met bijdragen van wind, zon, biomassa en waterstof. Hierbij werkt NRG sinds een aantal jaar samen met

TNO Energietransitie Studies. Centraal hierbij is de vraag onder welke voorwaarden een toekomstig energiesysteem zo optimaal en zo efficiënt mogelijk draait. Ook de overheid is zich bewust van het belang hiervan; het ministerie van Economische Zaken en Klimaat laat momenteel een onderzoek uitvoeren om de mogelijke rol van kernenergie in de toekomstige Nederlandse energiemix beter in beeld te krijgen.

Tenslotte: PIONIER is een programma dat ten dienste staat van de samenleving. De resultaten vinden niet alleen hun plek in wetenschappelijke tijdschriften maar ook in presentaties voor provincies, gemeenten en maatschappelijke organisaties die geïnformeerd willen worden over de laatste ontwikkelingen op het gebied van kernenergie. Lees deze opmerking ook als een uitnodiging aan kennis- en onderwijsinstellingen om mee te doen met NRG. Het verslag laat zien dat ook in 2021 het programma plaats bood aan meer dan 20 studenten van universiteiten en hogescholen. Als gezegd: de aandacht en de vraag naar nucleaire kennis neemt sterk toe. Kennis infrastructuur bestaat uit faciliteiten én mensen en om aan die vraag te kunnen voldoen is het belangrijk dat jonge mensen instromen; jonge mensen met nieuwe ideeën en kennis. Ter inspiratie komen in het onderzoeksjaarverslag onderzoekers, oud én jong, zelf aan het woord. Zij vertellen over hun onderzoek, waarom zij het belangrijk vinden en hoe zij door hun werk bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe kennis voor de samenleving. Heel veel leesplezier!

NRG start onderzoek naar ongevalsbestendige splijtstof

Europa bereidt zich voor op meer kernenergie. Bestaande kerncentrales blijven langer open en nieuwbouw wordt overwogen. Daarmee neemt ook de belangstelling toe voor ongevalsbestendige splijtstof. NRG start in samenwerking met de industrie een onderzoek naar splijtstofomhulling die ook in extreme (ongevals)omstandigheden heel blijft.

In een kerncentrale zit splijtstof achter tal van barrières. Die moeten bij een ongeluk voorkomen dat radioactiviteit in de omgeving terecht komt. De barrières variëren van betonnen bunkers tot aan de matrix van het splijtstoftablet zelf (waar de radioactiviteit in zit opgesloten). Een belangrijke tussenbarrière is de buis die de splijtstof omhult, ook wel cladding genoemd.

MINDER RADIOACTIEF AFVAL

De huidige cladding is meestal gemaakt van zircalloy, een metaallegering die voor meer dan 90 procent uit zirkonium bestaat. "Prima materiaal dat al heel lang wordt toegepast. Het wordt in de reactor niet heel erg radioactief, wat dus minder afval oplevert. Ook kan het materiaal goed tegen hoge temperaturen en hoge druk."

Maar als iets goed is, kan het mogelijk toch nog verder worden verbeterd. "En met het oog op langer en meer kernenergie, heeft de industrie én de vergunningverlener daar nu volop aandacht voor: ongevalsbestendige splijtstof."

Fysisch-chemicus en onderzoekscoördinator Mark Huntelaar leidt bij NRG het onderzoek naar ongevalsbestendige splijtstofomhulling. In feite gaat het dus om een doorontwikkeling van de bestaande splijtstofomhullingen tot een nog beter product. "De buizen waar de splijtstof in zit moeten zich uiteraard onder normale bedrijfsomstandigheden goed en efficiënt gedragen. Maar ze moeten ook heel blijven als de temperatuur en de druk plotseling oplopen."



Mark Huntelaar:

"De buizen waar de splijtstof in zit moeten heel blijven als de temperatuur en de druk plotseling oplopen."

Op deze manier kan NRG uitspraken doen over de invloed van de belangrijkste degradatiemechanismen op de ongevalsbestendigheid van de splijtstofomhulling ten opzichte van de normale conditie.

INGEWIKKELD APPARAAT

Het onderzoek naar nieuwe types zircalloy-buizen en alternatieven als titanium gestabiliseerd staal bevindt zich in de beginfase. "We zijn bezig met de ontwikkeling van een ingewikkeld apparaat dat in een razend tempo een druk van 1.200 bar kan opbouwen in een afgedopt stuk splijtstofbuis bij een temperatuur van 600 graden Celsius." Dat zijn namelijk de omstandigheden waar de splijtstofomhulling mee te maken zou kunnen krijgen. "En tegelijkertijd moeten wij onder die omstandigheden allerlei metingen kunnen doen aan de vervorming van de buis." Daarvoor worden keramische sensoren aangebracht op apparatuur die onder deze extreme omstandigheden op de micrometer nauwkeurig vervormingen kan registreren. Huntelaar: "Deze sensoren bestaan al, de apparatuur moet nog worden ontwikkeld."

Om een goede vergelijking te kunnen maken worden de proefbuizen eerst onbestraald getest. Daarna worden de monsters in de Hoge Flux Reactor voor een langere periode bestraald om reactoromstandigheden zo dicht mogelijk te benaderen. "Onder invloed van neutronenstraling kunnen de eigenschappen van de legeringen namelijk verslechteren waardoor ze minder goed tegen druk en temperatuur kunnen."

HOT-CELL

Het onderzoek aan de bestraalde buizen is overigens een stuk uitdagender. "Vanwege de radioactiviteit gebeurt de test in een speciale hot-cell met onderdruk om eventuele besmettingen in de cel te houden. Maar wij zijn juist op zoek naar het moment dat de testbuis onder hoge druk bezwijkt." Onderdruk en overdruk verhouden zich natuurlijk slecht met elkaar. "Het is uitdagend om een testopstelling te ontwikkelen die deze twee uitersten beheersbaar houdt."

De industrie heeft groot belang bij het onderzoek en werkt daarom al meerdere jaren nauw samen met NRG. "De klassieke zircalloy-splijtstofomhulling is waarschijnlijk sterk overgedimensioneerd. Daarom zoekt de industrie naar alternatieven: veiliger, efficiënter en goedkoper." In die volgorde, wel te verstaan: veiligheid voorop.

"We weten dat ten opzichte van de ontwikkelingen van decennia geleden verbeteringen mogelijk zijn." De industrie komt daarom met talloze kansrijke alternatieve legeringen. De kans dat de zoektocht tot verbeteringen leidt, is groot. Huntelaar verwacht dat NRG al in 2023/24 de eerste onbestraalde proefbuizen gaat testen. "Het jaar erop zijn de bestraalde buizen aan de beurt."

NRG is bezig met de ontwikkeling van een ingewikkeld apparaat dat in een razend tempo een druk van 1.200 bar kan opbouwen in een afgedopt stuk splijtstofbuis bij een temperatuur van 600 graden Celsius.



NRG draagt bij met Multi-Physics en Multi-Scale Computing

Kleine, modulaire drukwater-kerncentrales (Small Modular Reactors, SMRs) gaan naar verwachting een belangrijke rol spelen bij het halen van de klimaatdoelen van 2050. Door de energiecrisis vanwege de oorlog in Oekraïne zoekt de wereld naar een versnelling van de ontwikkeling van deze betaalbare reactoren. NRG draagt daaraan bij met het koppelen van de rekencodes van de verschillende 'kennis-eilandjes'. "Met integrale simulatie kunnen we de complexe reactorwerkelijkheid van een compacte SMR benaderen."

"Ik werk aan een model waarin de losse rekencodes van verschillende disciplines zijn gekoppeld: één integrale simulatie die voorspelt wat er in een SMR gebeurt in een ongevalsituatie. In dit model kan ook de onzekerheidsmarge, bijvoorbeeld in het materiaal, aangepast worden."

Christian Fedon is nucleair natuurkundige met Italiaanse roots. Omdat Italië zelf geen nucleaire ambities heeft, is hij – net als veel van zijn collega's – naar landen met een nucleair programma verhuisd. Hij werkt alweer zes jaar in de Nederlandse nucleaire sector en drie jaar bij NRG.

Zijn werk is uitdagend, want er bestaat in de wereld nog nauwelijks praktijkervaring met SMR's. "Bij simulaties van grote kerncentrales kunnen we teruggrijpen op de gegevens van vijftig jaar reactorervaring. Bij de SMR staan we nu aan het begin van de ontwikkeling."

Intussen krijgt de wereld wel haast met het ontwikkelen van SMR's. "Ondanks het gebrek aan praktijkgegevens beginnen we niet bij nul. NRG heeft immers wel lange ervaring met multi-physics modellering." Al vele jaren slaagt NRG erin om meerdere losse simulaties rekenkundig aan elkaar te koppelen tot één multidisciplinaire tool. Bovendien heeft NRG



Christian Fedon:

"Het hoofddoel van het Europese project is de bevordering van onderzoek naar de veiligheid van kleine modulaire reactoren."

"Er is voor deze versimpeling gekozen omdat het zo eenvoudiger is om een mogelijk ongevalsscenario in een gecontroleerde omgeving te onderzoeken, bijvoorbeeld door één regelstaaf te verplaatsen." Bovendien is het door de beperkte omvang van de mini-assembly eenvoudiger om in een later stadium de resultaten van de simulatie te verifiëren. Je wilt weten: klopt de bevinding van het model met de werkelijkheid?"

inmiddels veel ervaring met het bepalen van de onzekerheidsmarge van de uitkomsten van deze simulaties. "Juist dat bepaalt de waarde van het voorspellende karakter van deze simulaties."

GEDRAG SMR TIJDENS EEN ONGEVAL

Op deze kennis en kunde bouwt Fedon nu verder met ondersteuning van het ambitieuze onderzoeks- en innovatieprogramma van de Europese Unie, HORIZON 2020. Fedon: "Het hoofddoel van het Europese project is de bevordering van onderzoek naar de veiligheid van deze kleine modulaire reactoren."

Het gedrag van splijtstof bij een ongeval en dat van het koelmiddel kun je elk apart simuleren. Zelfs de integriteit van de reactor kun je simuleren. Maar alleen als je deze aspecten in hun onderlinge samenhang simuleert, krijg je een beeld van wat er in werkelijkheid zal gebeuren. "Wij dragen bij aan het antwoord op deze veiligheidsvraag door deze verschillende numerieke simulaties te combineren in één voorspellend model voorzien van een onzekerheidsmarge."

VERTROUWEN OPBOUWEN

Voor het modelleren van SMRs in 2021 koppelde NRG met succes codes voor reactorfysica aan die van thermo-hydraulica. De eerste stap die NRG zette, was de simulatie van een 'mini-assembly' met slechts één regelstaaf omringd door acht brandstofstaven.

VALIDATIE

Vanaf volgend jaar gaat NRG de methodiek die toegepast is op de 'mini-assembly' valideren aan de hand van resultaten van thermo-hydraulische experimenten die elders in de wereld zullen plaatsvinden. "Je moet dan denken aan landen die nu volop bezig zijn met de ontwikkeling van SMRs, van Zuid-Korea en Frankrijk tot Argentinië en de Verenigde Staten." De belangstelling voor het simulatiewerk van NRG is dus niet alleen groot maar ook nog eens wijdverbreid.

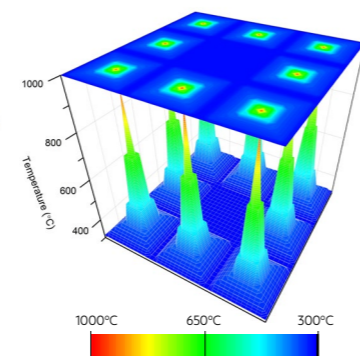
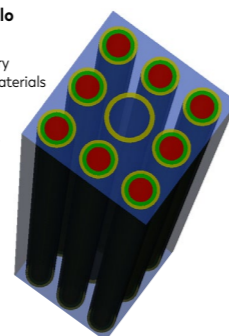
"We willen op onze schaalbare manier eerst ervaring opdoen en zo vertrouwen krijgen in de koppeling van de codes. Ook willen we erachter komen wat het beste wiskundige kader is om de onzekerheid in een dergelijk model op te nemen. Volgend jaar zullen we opschalen tot we uiteindelijk de echte proporties van een SMR in beeld hebben."

Daarna kan NRG realistische voorspellingen doen van het gedrag van een SMR onder ongevalsomstandigheden. "Als we dat kunnen, is de introductie van de SMRs weer een stukje dichterbij," besluit Christian Fedon.

Links het "mini-assembly"-model dat in de simulatie gebruikt wordt. Met verschillende kleuren kunnen verschillende materialen geïdentificeerd worden. Het element bestaat uit acht brandstofstaven en één regelstaaf.

Rechts een 3D-model van de temperatuurvariaties, van 300 graden van de omringende water tot 1000 graden in het centrum van de brandstof. Door de stroming van de koelvloeistof wordt de hitte afgevoerd.

DB: fields.silo
Cycle: 0
Filled Boundary
Var: mixed_materials
● 0 void
● 1 He Gap
● 2 Zircaloy-4
● 3 Water
● 4 Fuel



Kerncentrales langer in bedrijf:

Voorspellen én herstellen degradatie reactorvatstaal

Kerncentrales over de hele wereld blijven langer in bedrijf. Daarvoor is het noodzakelijk om aan te tonen dat het reactorvat ook in de toekomst veilig blijft. Bekend is dat staal onder invloed van neutronenstraling en hoge temperaturen degradeert. NRG bracht in kaart wat het verloop van dit proces is. “En wat belangrijker is: we hebben aangetoond dat gedegradieerd reactorvatstaal bijna volledig kan worden hersteld.”

Materiaalwetenschapper Murthy Kolluri heeft een groot deel van zijn tienjarige carrière bij NRG onderzoek gedaan aan wat bekend staat als ‘de Armeense ketting’. Een wat mysterieuze naam voor een ketting van reactorvat-staalmonsters die 27 jaar lang in de kern van de Armeense kerncentrale van Metsamor hing. Kolluri: “Het deel van de ketting dat in de reactor kern hing, werd belast door hoge temperaturen in combinatie met neutronenstraling. Het stuk boven de reactor kern ving wel hoge temperaturen op maar géén neutronenstraling.” Door de karakterisering van deze monsters konden we de invloed van langdurige neutronenstraling en temperatuur op de degradatie van dit staal bestuderen. “De Armeense ketting bevatte dus een schat aan informatie over het gedrag van staal onder praktijkomstandigheden in een kerncentrale.”

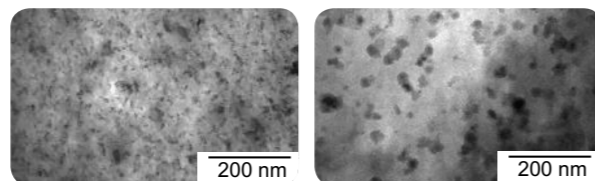
300 JAAR STRALING

Omdat de ketting 27 jaar in de kern hing, dicht op de neutronenbron, ving het staal bijzonder veel straling op. “Een factor tien meer dan de straling die het reactorvat tijdens zijn ontwerp-levensduur van 30 jaar heeft ontvangen.” Met andere woorden: terwijl de reactor 27 jaar in bedrijf was, vingen de staalmonsters voor 300 jaar straling op. “We zouden daaraan dus kunnen zien wat de conditie van het reactorvat na 300 jaar bedrijf zou zijn geweest!”

Vanwege het beperkte aantal beschikbare monsters, werden de gebroken stukken van geteste monsters opgedeeld in een groot aantal kleinere monsters. Voor het testen van deze kleinere testmonsters in hot cel laboratoria zijn bij NRG nieuwe testmethoden ontwikkeld. Talloze experimenten en onderzoeken werden verricht en er ontstond een

Microstructuur van de bestraalde surveillance monsters voor en na de thermische behandeling bij 475 °C

De thermische behandeling bij 475 °C leidt tot herstel van mechanische eigenschappen door vernietiging van door straling geïnduceerde microstructurele schade. Dat is de fijne ‘zwarte stip’ schade in figuur links; de foto rechts laat zien dat de resterende defecten zich geconcentreerd hebben in grotere clusters.



Murthy Kolluri:

“ Terwijl de reactor 27 jaar in bedrijf was, vingen de staalmonsters voor 300 jaar straling op. ”

GESCHIEDENIS ÉN TOEKOMST VAN DE ARMEENSE KETTING

Het Armeense staal is zo'n tien jaar geleden in het bezit van NRG gekomen dankzij de inmiddels overleden Russische materiaalwetenschapper Alexander Kryukov. “Hij werkte voor de Europese Commissie en NRG en was een visionaire man. Dankzij hem kunnen we nu dus in de toekomst van een reactorvat kijken.”

Het ‘ophalen’ van de ketting en het transport ervan uit Armenië naar NRG was op zich al een bijzonder project. “Er moesten door NRG speciale tools worden gemaakt om de hoogradioactieve ketting uit het reactorvat te halen.” Ook was er een speciale transportcontainer nodig en was het internationale transport van de ketting naar Petten erg uitdagend. Eenmaal in Nederland moesten er nog allerlei onderzoeksvoorzieningen worden ontwikkeld en gebouwd voordat er echt onderzoek aan het geactiveerde staal kon worden gedaan.

“De enorme waarde van de ketting en de informatie die zij voortbrengt, rechtvaardigt alle inspanningen uit het verleden,” weet Kolluri zeker. Alleen bleek het aantal beschikbare monsters een beperkende factor. “Daarom hebben we inmiddels een gestandaardiseerde methode ontwikkeld voor de fabricage van kleinere test monsters uit de oorspronkelijke monsters.” Dit werk is inmiddels ondergebracht in een nieuw Europees onderzoeksprogramma dat opnieuw weer waardevolle resultaten zal opleveren.

zee aan informatie die kon worden vergeleken met de nul-situatie. “Omstreeks 2018 hadden we zoveel kennis over de degradatie van reactorvatstaal verzameld, dat we ons konden gaan concentreren op de volgende uitdaging. We wilden de mogelijkheden van het herstellen van het beschadigde reactorvatstaal verkennen.”

VEROUDERD STAAL WEER ALS NIEUW!

Kolluri: “Uit de literatuur was het al bekend dat je gedegradieerd reactorvatstaal met hittebehandeling kunt herstellen. Het Armeense staal gaf ons de mogelijkheid om aan te tonen dat deze techniek ook werkt voor dergelijke sterk bestraalde staalsoorten met een neutronendosis die gelijk is aan 300 jaar.”

Experimenten bij NRG bevestigden dat de afgenomen sterkte van bestraald staal bij opwarming tot een temperatuur 475°C grotendeels weer tenietgedaan wordt gedaan. “Het staal komt nagenoeg weer in de conditie van de nul-situatie.”

Voor veel van de Oost-Europese kerncentrales is dat nu dus onomstotelijk aangetoond. “Maar de resultaten bieden ook houvast voor Westerse kerncentrales die langer in bedrijf willen blijven. Ook daar kun je verouderde reactorvaten thermisch behandelen waardoor ze nagenoeg weer als nieuw worden.”

Internationale stand van zaken rond het afbreken van nucleaire installaties

Nederland bereidt zich voor op de onvermijdelijke afbraak van nucleaire installaties. Dit moet veilig en verantwoord gebeuren. Daarom verdiept NRG zich in internationale regelgeving. Ook inventariseert NRG robotica en ondersteunende software die het werk in een radioactieve omgeving voor mensen veiliger maken.

Jaap Hart heeft zijn sporen in de nucleaire sector ruimschoots verdiend. Eerst met onderzoek naar de veiligheid van kerncentrales en ongevalsanalyses. En later met het onderzoek naar de eindberging van radioactief afval. “Inmiddels zit ik volop in de materie van het afbreken van onder meer kerncentrales.”

Vanwege zijn expertise is Hart betrokken bij het IAEA-project Completion of Decommissioning, kortweg COMDEC. De informatie die binnen dat project wordt uitgewisseld, zal gaan dienen als basis voor een nieuwe IAEA Safety Guide over de laatste stadia van de ontmanteling van nucleaire faciliteiten tot

aan de vrijgave van het gebruikte terrein. “De COMDEC-richtlijnen beginnen bij een leeg nucleair gebouw dat moet worden afgebroken en leiden stap voor stap naar een gewenste eindsituatie.”

OOK KENNIS VERVALT!

COMDEC is een actualisatieslag. “De huidige richtlijnen van het IAEA dateren uit 2006 en worden binnen COMDEC tegen het licht gehouden,” vertelt Hart. “Sindsdien is een significant aantal nucleaire faciliteiten ontmanteld. Vanwege de kennis die daarbij is opgedaan, is het weer eens tijd voor een update van de betreffende Safety Guide.



Jaap Hart:

“ De nieuwe IAEA-richtlijnen zijn heel praktisch van aard om ook landen te helpen met een minder ontwikkeld overheidsapparaat. ”

De locatie van de Lage Flux Reactor (LFR) in Petten voor én na de afbraak die in 2018 voltooid is.



Voorheen vonden we dat je een uitbedrijf genomen installatie langdurig ongemoeid moest laten zodat de radioactiviteit zo veel mogelijk kan vervallen. Inmiddels beseffen we dat met het vertrek van ervaren medewerkers ook de kennis over de installatie vervalst.”

Een ander aandachtspunt in COMDEC betreft het eindtoestand van het terrein na afbraak van de faciliteit, de zogenoemde ‘groene weide’. “Wat is een groene weide? Mag je delen van de ondergrondse infrastructuur dan bijvoorbeeld laten zitten?” In sommige landen wordt overwogen om géén groene weide op te leveren, maar een zogenaamde ‘bruine weide’. Bijvoorbeeld in landen die geen goede voorzieningen hebben om laagradioactief afval op te slaan. “Dan kun je overwegen een deel van het afval gecontroleerd achter te laten op de afbraaklocatie. Dan weet je in ieder geval wat er ligt en waar het is. Deze optie wordt in Nederland trouwens niet beschouwd.”

De nieuwe richtlijnen van het IAEA zullen heel praktisch van aard zijn om zo veel mogelijk landen te helpen met een goede oplossing. Ook landen met een minder ontwikkeld overheidsapparaat. “En dat is ook in ons voordeel. Radioactieve vervuiling stopt niet bij de grens.”

STATE OF THE ART

Naast het theoretische werk voor het IAEA is Jaap Hart ook betrokken bij een heel praktisch onderwerp. “Juist doordat wij in ons land nog niet zoveel nucleaire installaties hebben afgebroken, behalve dan de Lage Flux Reactor in Petten, hebben wij niet heel veel praktische ervaring.”

Om toch berekend te zijn op toekomstige ontmantelingen voert NRG een studie uit naar state-of-the-art technologie op het gebied van robotica en digitale hulpmiddelen. “Robots die kunnen kijken, meten, snijden, zagen of breken in een radioactieve omgeving voorkomen stralingsbelasting bij de mens.” Dat geldt ook voor digitale hulpmiddelen zoals simulaties of beeldvormende technieken die radioactiviteit en straling in het te ontmantelen gebouw 3D zichtbaar kunnen maken, of kunnen helpen bij het simuleren van risicovolle acties.

“Door de stand van deze technieken bij te houden, houden we de vinger aan de pols. Want eens zullen we ook in Nederland de bestaande nucleaire installaties gaan opruimen,” aldus Jaap Hart.

NRG participeert in European Utility Requirements Kerncentrales goedkoper, eerder en sneller bouwen door harmonisatie en standaardisatie

Nederland heeft plannen voor de bouw van nieuwe kerncentrales. Tegelijkertijd wordt aan alle kanten gewaarschuwd voor hoge kosten en een lange bouwtijd. Kan dat niet anders? “Jazeker, door harmonisatie van eisen en standaardisatie van ontwerpen door leveranciers.” Om die reden neemt NRG deel in de EUR-samenwerking. EUR staat voor European Utility Requirements, een samenwerkingsverband van Europese (nucleaire) elektriciteits-bedrijven.

“Het vergunningtraject voor een kerncentrale is een uiterst kostbaar en langdurig proces,” stelt Bart Henstra die namens NRG deelneemt aan het EUR-initiatief. “Het gaat om talloze documenten. Ze beschrijven in zeven stappen alles tussen de groene weide vóór de bouw en ná de afbraak van de kerncentrale.” Van locatie onderzoek, tot ontwerp, bouw, inbedrijfname, bedrijfsvoering, ontmanteling en uiteindelijke vrijgave van de locatie. “Dit alles moet vooraf vastliggen in de vergunning, lang voor de schop de grond in gaat.”

WINST

Er is veel winst te behalen als zowel de vergunningverleners als de kerncentrale-ontwerpers binnen Europa dezelfde eisen en beoordelingsmethoden hanteren. “Als je de procedures kunt bespoedigen, bespaar je veel geld.” En sneller bouwen, betekent ook sneller met kernenergie bijdragen aan een klimaat-neutrale energiehouding.

“Dat klinkt uiteraard heel logisch, maar het is een hele klus. Binnen EUR gaat het in totaal om bijna 6000 eisen die blijven evolueren.” Immers, één van de kenmerken van de nucleaire industrie is het continu verbeteren van de veiligheid. “De eisen worden dus

steeds strenger.” Leerervaringen, bijvoorbeeld van Fukushima, worden teruggevoerd op eisen. “Maar denk ook aan innovaties en technologische vooruitgang.” De EUR drukt die trend uit in revisie-fases. De EUR startte in 1991 met Revisie A inmiddels zijn ze beland in Revisie E. “En in 2024 verschijnt Revisie F.”

ONTWERP-CERTIFICAAT

Voor nieuwe ontwerpen van grote drukwater kerncentrales bestaat de mogelijkheid deze tegen de 6000 eisen van EUR te laten beoordelen. Alle grote leveranciers laten dat ook daadwerkelijk doen.

Henstra: “De EUR doet dan een assessment en geeft met een certificaat (begeleid door gedetailleerde beoordelingsrapportages) aan dat een ontwerp in voldoende mate overeenkomt met de vereisten.” Omdat de EUR geen autoriteit is, staat het certificaat niet gelijk aan een vergunning. “Wel weet een toezichthouder van een Europees land zeker dat een gecertificeerd ontwerp ook daadwerkelijk vergunbaar is.”

De toezichthouder kan zich vervolgens concentreren op specifieke afwijkingen voor



Bart Henstra:

“ Er is veel winst te behalen als vergunningverleners en ontwerpers dezelfde eisen en beoordelingsmethoden hanteren. ”

een bepaald land. “Het gaat dan om detail-afwijkingen van het gecertificeerde basis-ontwerp.” Henstra geeft een duidelijk voorbeeld: aardbevingsbestendigheid. “Op de granietbodem van Finland kan volstaan worden met een lagere ontwerpversnelling dan de wat instabieler bodem in Frankrijk.”

TIJD EN GELD BESPAREN

“Een goede beoordeling door de EUR organisatie op een kerncentrale-ontwerp zorgt dus voor besparing in tijd en geld. De overheid kan zich meer concentreren op het juridisch juiste verloop van de procedure omdat het meeste technische voorwerk al is gecontroleerd.” Met andere woorden: als er overeenstemming is over de basisuitgangspunten van een ontwerp, hoeft niet ieder land het wiel opnieuw uit te vinden. Het kan zich dan concentreren op de nog resterende land/regio specifieke aspecten en specifieke wensen van de eigenaar van de centrale.

SMALL MODULAR REACTORS

Waar met standaardisatie voor grote kerncentrales al grote stappen zijn gezet, moet er voor de Small Modular Reactors nog veel werk worden verzet. “Je ziet dat hier de ontwerpen nog volop in ontwikkeling zijn

en de harmonisatie van ontwerpeisen nog grotendeels moet gebeuren.”

“Het gaat bij allebei om licht water reactoren waarmee volop ervaring is opgedaan met betrekking tot ontwerp, bedrijfsvoering en materiaalgedrag. Alleen de vertaling naar standaard ontwerpeisen is nog lastig.” SMRs kijken qua ontwerp op bepaalde punten sterk af van hun grote broers. “Je ziet dat ontwerpen compacter worden gemaakt door technische onderdelen te integreren.” Waar in grote centrales bijvoorbeeld het reactorvat en de stoomgenerator aparte onderdelen zijn, worden die in SMRs vaak geïntegreerd.

Uiteraard ziet de industrie de noodzaak in van ontwerp-standaardisatie van deze kleine modulaire reactoren, dus ook hier wordt flink aan gemeenschappelijke ontwerpregels gewerkt. “Al bij de volgende EUR revisie in 2024 worden specifieke eisen opgenomen voor kleine modulaire licht water reactoren.”

Stabiliteit van radioactief afval

NRG doet onderzoek aan gemengd middelradioactief afval. In dit samengestelde afval werken dosisafgifte, chemische processen en gasvorming op elkaar in. Dat kan tot problemen leiden zoals corrosie aan de verpakking. De samenleving wil zeker weten dat de stabiliteit van dit radioactief afval voor decennia is gegarandeerd.

Onze samenleving produceert een zekere hoeveelheid radioactief afval, afkomstig uit ziekenhuizen, de (nucleaire) industrie en laboratoria. Het middel-actieve afval – dat langdurig moet worden opgeslagen – heeft meestal geen homogene samenstelling. Het bevat allerlei stoffen zoals bijvoorbeeld polyvinylchloride (PVC), teflon en polyethyleen (PE).

In de loop van decennia veranderen deze stoffen onder invloed van straling. Ook beïnvloeden ze elkaar waarna er weer nieuwe producten en gasen ontstaan. Maar welke? En hoeveel? “Als we de achterliggende processen beter snappen, kunnen we ook voorspellen hoe radioactief afval zich over een lange opslag-

periode gedraagt. En welke maatregelen je kunt nemen om dit afval stabiel te houden.”

Aan het woord is nucleair scheikundige Ronald Middendorp. Al vier jaar onderzoekt Ronald in teamverband de stabiliteitsissues rond het historisch radioactief afval dat bij NRG in een interim-opslag ligt. Dat gemengde radioactieve afval is vele tientallen jaren oud. De voorbereiding op veilige opslag bij COVRA vraagt om de ontwikkeling van nieuwe technologische oplossingen. “De stalen vaten waarin het afval een halve eeuw geleden is opgeslagen zijn door radiochemische reacties aangetast. We zien het resultaat, we kennen de oorzaak maar we snappen eigenlijk nog



Ronald Middendorp:

“ Als we de processen snappen, weten we ook hoe radioactief afval zich over een lange periode gedraagt. ”

wordt geabsorbeerd, slechts een deel. Maar welk deel?

MONTE CARLO

De crux zit 'm dus in het realistisch uitrekenen van de dosisabsorptie. NRG gebruikt daarvoor de Monte Carlo simulatiemethode. Daarbij wordt het fysieke stralingsproces in het afval niet één keer, maar talloze keren gesimuleerd met telkens andere condities. “Uit de grote verzameling simulaties die je dan krijgt, kun je – zeg maar – een gemiddelde halen.”

Uit de analyse van de resultaten valt vervolgens af te leiden welke aspecten wel en niet belangrijk zijn voor de uitkomsten van het fysische proces. “We gaan daardoor beter snappen hoe moleculen reageren op hun chemische en radioactieve omgeving.”

Met dit inzicht kun je voorspellen hoe stoffen zich in de loop van vele tientallen jaren in zo'n complexe omgeving gedragen. “Je kunt ook oplossingen aandragen in de vorm van drempelwaarden voor bepaalde verhoudingen tussen stoffen in het afval. Of materiaal dat je moet vermijden in de afvalsamenstelling.” Zo heeft Ronald Middendorp op verzoek van collega's gekeken naar 3D-printmateriaal voor nucleair laboratoriumonderzoek. “Laboratoriummateriaal dat is besmet, wordt behandeld als radioactief afval. We hebben alle kandidaat-plastic printmaterialen doorgerekend op het gedrag in de loop van decennia. Ze waren eigenlijk allemaal geschikt om bij het afval te doen. Bij eentje hadden we wat twijfel. We hebben geadviseerd die maar niet te gebruiken.”

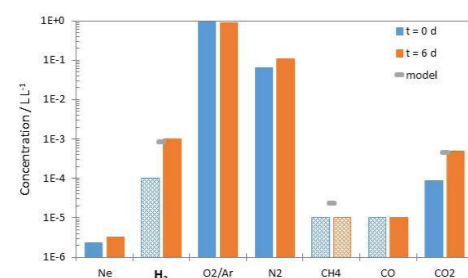
niet volledig wat de onderliggende processen zijn.”

DIEPER GRAVEN

Er zijn aannames gedaan. “Uit PVC ontstaat onder invloed van straling zoutzuur. Dat zou het staal hebben aangetast. Maar ga je dieper graven, dan ontdek je dat deze aanname geen stand houdt.” Zoutzuur geeft een kortdurende eenmalige chemische reactie en dat geeft geen verklaring voor de waargenomen omvang van de corrosie van de vaten. “Wij denken nu dat daarnaast ook nog een chloor-gedreven reactie plaatsvindt. Die werkt als een katalysator door tot in het oneindige. Dat onderzoeken we op dit moment.”

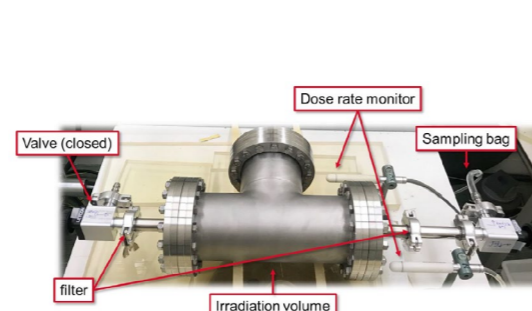
Soortgelijke vraagstukken gelden ook rond andere stoffen: uit teflon komt fluor vrij, uit PE waterstofgas. “Eigenlijk uit alle organische verbindingen. Om het proces hierachter te kunnen doorgronden, moet je allereerst weten hoeveel straling zo'n stof absorbeert.” Tot op heden was de conservatieve aanname dat alle afgegeven straling werd opgenomen. “Maar bij die aanname krijg je onrealistische uitkomsten. Zo zou uit een zekere hoeveelheid PE al na een decennium een gevaarlijke hoeveelheid waterstof vrijkomen. Wij hebben berekend dat dit in werkelijkheid pas na een eeuw het geval is.” Immers: niet alle straling

Gasvorming na bestraling van PE met röntgenstraling



Blauw: direct na de bestraling / Oranje: 6 dagen erna
Er is een duidelijke toename van de H₂ (en CO₂) concentratie te zien. Dit komt overeen met het NRG-model.

Opstelling, gevuld met PE



Lesmodule Kernenergie middelbare scholen: Jong geleerd, oud gedaan

Middelbare scholieren enthousiast maken voor nucleaire technologie, dat is de opdracht voor trainees van de Junior Academy van NRG. Een eerste lesmodule over medische beeldvorming - waar veel nucleaire techniek voor nodig is - bleek een succes. Een lesmodule kernenergie is in de maak.

Grigori Giannakoudakis heeft een passie voor onderwijs. Al tijdens zijn studie Technische Natuurkunde stond hij voor de klas op zijn oude middelbare school om wis- en natuurkunde te doceren. "Een parttime bijbaan, maar zó leuk dat het onderwijs nog altijd in mijn achterhoofd zit, ook al werk ik nu bij NRG als junior consultant."

Het team waar Giannakoudakis deel van uitmaakt bestaat uit twee natuurkundigen, een chemicus en een 'natuurkundig econoom'.

"En we hebben alle vier onderwijservaring." Hun gezamenlijke motto: 'elk onderwerp kun je interessant maken als je het maar goed brengt'. Giannakoudakis: "Wij willen dat eind-examenleerlingen van HAVO en VWO zich niet alleen een voorstelling kunnen maken van het onderwerp kernenergie, maar er ook iets bij gaan voelen." De kunst hierbij is de vertaling naar opdrachten waar de leerlingen enthousiast van worden. Zoals: Kom, we gaan een kerncentrale runnen! Of: kom, we gaan het klimaatprobleem oplossen!



Grigori Giannakoudakis:

"Elk onderwerp kun je interessant maken als je het maar goed brengt."

aangeboden, die ze al snel zelf in de praktijk kunnen brengen. "Ze gaan dan zelf ervaren dat er aan kernenergie niet alleen bezwaren kleven, maar dat je er ook maatschappelijke vraagstukken mee kunt oplossen." Denk aan het ruimtegebruik, dat voor een kerncentrale veel kleiner is dan voor een windpark. Denk aan de elektrificatie van de samenleving die het stroomgebruik in de komende decennia laat groeien.

LAAGDREMPELIG COMMUNICEREN

De lesmodules over nucleaire techniek zijn een goed voorbeeld van de taak die NRG heeft om (namens de overheid) feitelijke informatie te geven over kernenergie. Door hier NRG-trainees voor in te zetten, snijdt het mes aan twee kanten. Jonge NRG-instroom leert al aan het begin van hun carrière om breed en laagdrempelig te communiceren over hun vakgebied. En de scholieren krijgen hun lessen zo'n beetje direct uit de 'hot-cell' van het nucleaire onderzoek gereserveerd.

De lesmodule 'medische beeldvorming', waarbij de leerlingen op de stoel van de nucleair geneeskundige gaan zitten, wordt inmiddels alweer twee jaar enthousiast gebruikt door het onderwijs. De lesmodule 'kernenergie' is nu nog in ontwikkeling. Naar verwachting komt hij in 2023 beschikbaar voor middelbare scholen.

Giannakoudakis geniet ervan om onderwerpen die hem zelf bezighouden op deze manier gepassioneerd over te brengen op kinderen. "Je moet het interessant voor ze maken, dan worden ze vanzelf enthousiast en dat is voor de docent zelf ook leuk."

STIGMA

Enthousiasme is hard nodig omdat leerlingen van hun ouders nog steeds vooral de negatieve aspecten van kernenergie meekrijgen. "De voordelen blijven onbekend. Vraag je aan iemand uit een oudere generatie om vijf algemene kernwoorden over kernenergie, dan is de kans groot dat *Tsjernobyl* op één staat en op twee *Fukushima* en dat in het rijtje *CO₂-neutraal* gewoon totaal ontbreekt. Met de lesmodule willen we dit meer in balans brengen. De nadelen behandelen we natuurlijk ook, maar ze worden afgezet tegen de voordelen. Scholieren kunnen daarna zelf tot een gewogen oordeel komen."

GROTE PROBLEMEN OPLOSSEN

De lesmodule die het viertal ontwikkelt, wordt kant-en-klaar als download aan middelbare scholen beschikbaar gesteld. "Natuurkunde docenten gaan vervolgens zelf met het onderwerp in de klas aan de slag. De les wordt interactief en leuk, met een belangrijke rol voor de leerlingen zelf." Ze krijgen eerst wat theoretische kennis

Aanbevelingen toezichthouder geactualiseerd:

PSA-3 methode aangepast

De veiligheid van kernenergie moet worden aangetoond met een risicoanalyse. In Nederland gebeurt dat op drie niveaus: de kans op het smelten van de reactorkern (1), de kans dat dit leidt tot radioactieve emissies (2) en ten slotte de gevolgen voor de bevolking (3). Voor dit laatste niveau zijn de aanbevelingen gemoderniseerd.

“PSA staat voor Probabilistic Safety Assessment, vast onderdeel van de verplichte veiligheidsstudie voor wie een kernenergievergunning nodig heeft,” legt natuurkundige en PSA-specialist Jacques Grupa van NRG uit. “PSA-1 berekeningen leiden tot het getal dat de kernsmeltfrequentie weergeeft, PSA-2 tot het getal dat de kans op een radioactieve lozing uitdrukt. En PSA-3 bepaalt de blootstelling aan radioactieve straling (dosis)

en de daarmee samenhangende risico's voor omwonenden, mocht het tot die lozing komen.” De geactualiseerde handreiking voor de laatste rekenstap (PSA-3) is in 2020 gepubliceerd door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

SEVESO, TSJERNOBYL

Het kwantificeren van risico's vindt zijn oorsprong in de Seveso-richtlijn (1982) die de



Jacques Grupa:

“ Nieuw zijn de eisen aan risico's voor wie zich in de buurt van de installatie bevindt. ”

weergegevens van de afgelopen kwart eeuw, legt Grupa uit. Uiteraard zijn die voor Borssele anders dan voor Petten of Almelo en 's zomers zijn er dus andere risico's dan bijvoorbeeld in het najaar. “Wij bepalen in PSA-3 de kans op een bepaald weertype op een bepaald moment op een bepaalde plek en het effect daarvan op de risico's voor de bevolking.”

Voorheen lag de nadruk op risico's voor omwonenden buiten terreingrens. Nieuw zijn de eisen die gesteld worden aan risico's voor mensen die zich direct in de buurt van de installatie bevinden. “Denk aan werknemers van niet-nucleaire bedrijven die zich op het bedrijventerrein hebben gevestigd.” Daardoor wordt het berekenen van dosislimieten in de onmiddellijke nabijheid van gebouwen relevant. De NRG-rekenmethode wordt hierop aangepast door bijvoorbeeld delen uit andere methodes over te nemen en in te passen.

BENCHMARK

“In ons omringende landen is PSA-3 niet verplicht, bij ons wel. Dus heeft de manier waarop PSA-3 berekeningen plaatsvinden een wat sterker nationaal karakter.” Mede om de internationale aandacht te vestigen op PSA-3, onderzoekt NRG samen met de Nuclear Energy Agency (NEA) de mogelijkheid van een internationale PSA-3-benchmark. “Je wilt uiteraard weten of de uitkomsten van jouw methode overeenkomen met die van collega's. Je kunt immers niet met een risicometer naast een kerncentrale gaan staan om te controleren of wat je hebt uitgerekend overeenkomt met de werkelijkheid,” aldus Jacques Grupa.

Europese Unie uitvaardigde na de ramp met de daar gevestigde Italiaanse chemische fabriek. Nederland besloot dat chemische én nucleaire bedrijven met potentieel gevaarlijke processen voortaan de risico's voor omwonenden moesten bepalen. Het Probabilistic Safety Assessment werd vast onderdeel van de vergunningverlening met een zekere nadruk op de PSA-1. “Na de kernramp in Tsjernobyl, toen zich grote hoeveelheden radioactiviteit door de lucht over Europa verspreidden, kwam PSA-3 in een stroomversnelling.”

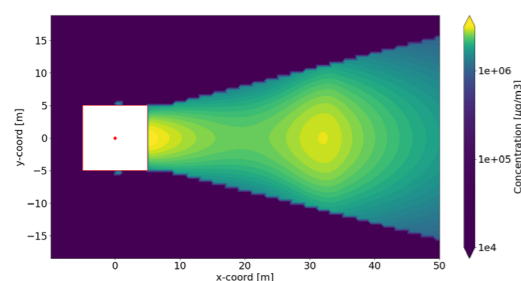
PSA-berekeningen drukken risico's uit in een getal dat getoetst kan worden aan een wettelijke limiet. “Verander je iets aan een installatie, dan reken je PSA 1, 2 en 3 opnieuw door. De bedoeling is dat verbeteringen, zoals de aanleg van een extra koelsysteem, tot een kleiner risico leiden.” Maar het kan ook voorkomen dat een systeem vanwege onderhoud een poos niet beschikbaar is. “Dat kan juist leiden tot een grotere kans op kernsmelt, een lozing en dus gevolgen voor de omgeving. Die effecten zijn dus uit te rekenen.”

VARIABELN

De PSA-3-risico's zijn sterk afhankelijk van het weer op het moment van een lozing. “Windrichting, windkracht, wel of geen neerslag: in PSA-3 wordt gerekend met heel veel variabelen.” NRG gebruikt daarvoor onder meer de

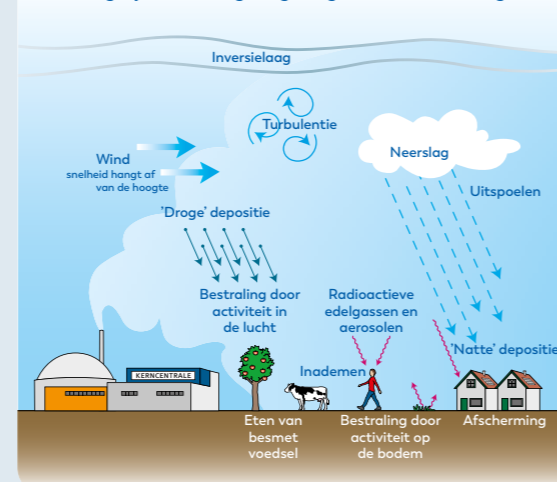
De concentratie van een radioactieve emissie vanaf een fictief (rood) punt op een fictief (wit) gebouw

De wind waait van links naar rechts. De pluim slaat neer in de luwte van het gebouw, waardoor een hoge concentratie radioactiviteit op twee plaatsen direct achter het gebouw neerslaat. Verderop neemt de concentratie weer af.



De ingrediënten voor PSA-3 overzichtelijk samengebracht in één afbeelding

Mogelijke belasting omgeving na nucleaire lozing



Rekenen aan de levensduur van bouten in een reactorvat

Kerncentrales over de hele wereld blijven langer in bedrijf. Bij verlengde bedrijfsduur hoort ook tijdige vervanging van versleten componenten. Inzicht in verouderingsprincipes en voorspellen van het juiste moment van vervanging of onderhoud zijn daarbij essentieel.

NRG werkt aan een rekenmethode voor bouten in een reactorvat. Een thermo-mechanisch model dat per bout en per plaats in het reactorvat aangeeft wanneer het einde van de levensduur is bereikt. “Dus bouten niet langer preventief vervangen zoals dat nu gebeurt. Het is goedkoper bouten te vervangen op het moment dat het ook echt nodig is.” Minstens zo belangrijk: het personeel wordt niet onnodig blootgesteld aan radioactieve straling.

Het binnenwerk van een reactorvat van een kerncentrale bestaat uit een kern met splijtstofelementen waarin de kernsplijting plaatsvindt. Daaromheen staan allerlei voorzieningen die koelmiddel langs en door de kern leiden om de splijtingswarmte af te

voeren. Het binnenwerk wordt met talloze boutverbindingen op zijn plaats gehouden.

Werktuigbouwkundige Peter Baas is expert in het ontwikkelen van thermo-mechanische modellen. “Daarmee kunnen we voorspellen wat de invloeden zijn van temperatuur, koelmiddel, andere materialen en neutronenstraling op de integriteit van die stalen bouten.” Met name de neutronenstraling maakt dit tot een ingewikkelde rekenklus.

TIJDGERELATEERD DEGRADATIE-MECHANISME

“Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking (IASCC) is een tijdgerelateerd degradatie-mechanisme waarbij materialen die worden



Peter Baas:

“ Met deze rekenmethode kan onnodige vervanging van bouten in een reactorvat worden voorkomen. ”

blootgesteld aan neutronenstraling vatbaarder worden voor spannings-corrosiescheuren. Het uitdagende is dat we het mechanisme achter IASCC eigenlijk nog niet helemaal kunnen doorgronden.”

Het theoretische werk van Peter Baas wordt om die reden permanent gevoed door experimenten van materiaalonderzoekers. “Hoewel deze modellen eigenlijk nooit af zijn, worden ze wel steeds beter. Ze evolueren.”

In 2021 lag de focus van Baas in eerste instantie op het bouwen van een globaal rekenmodel. Toen zijn focus later in het jaar verschoof naar een meer gedetailleerde en lokale modellering, ontdekte Peter Baas dat met name de zwelling van bouten ten gevolge van neutronenstraling door de rekenmethode nogal werd ‘overdreven’. “Ze zwollen in theorie meer en sneller op dan we in werkelijkheid zien gebeuren.” Dit moest dus beter, stelde Baas vast.

KANTELPUNT

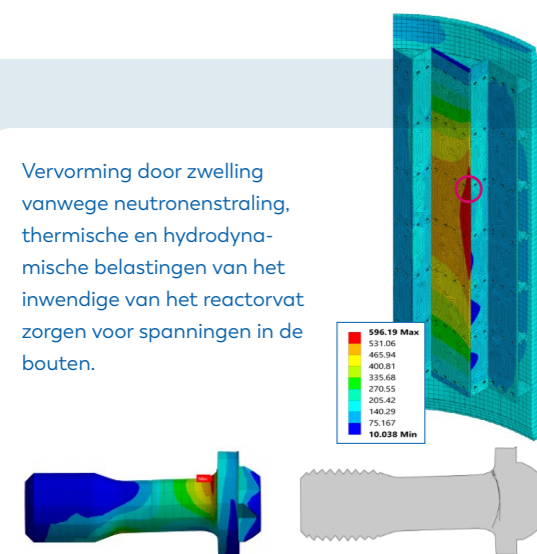
Dat de bouten verouderen en op een gegeven moment kunnen falen, is bekend. “Ook weten we dat er ergens een kantelpunt is: de eerste decennia jaar gebeurt er weinig. Daarna treedt er onder invloed van straling een versnelling op in de veroudering.” Wat daarvan de oorzaak en het verloop zijn, wordt nog altijd onderzocht. De uitkomsten hiervan voert Peter Baas voortdurend weer terug in zijn thermo-mechanische model.

Uiteraard willen kerncentrale-exploitanten vanuit onderhoudsoogpunt breuk van een bout voor zijn. “Omdat kerncentrales nu veel langer in bedrijf blijven, willen onderhoudsmensen in de toekomst kunnen kijken.” Ze willen dus beter grip krijgen op Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking en (kostbaar) preventief onderhoud vervangen door veel gerichtere toestandsafhankelijk onderhoud. “Zij willen per bout en per plaats in het reactorvat de effecten van Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking kunnen berekenen.” En dat moet zo precies mogelijk gebeuren, met rekenmodellen die de werkelijkheid zo dicht mogelijk benaderen. “Ze weten dan welke bout op welk moment moet worden vervangen.”

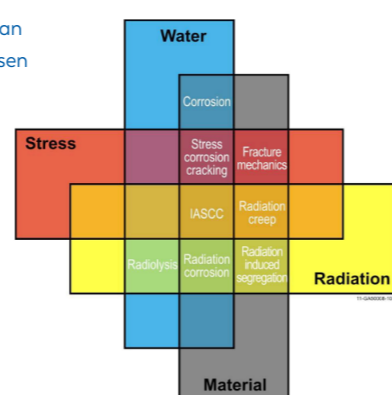
DICHTER BIJ DE WERKELIJKHEID

Uiteindelijk slaagde Peter Baas er in om in 2021 de NRG-rekenmethode een stuk dichterbij de werkelijkheid te krijgen: “Het zwellen van de bouten is in vergelijking met de eerdere versie nu met een orde van grootte verminderd.” De berekende zwellingen zijn minder en treden later op in de tijd. “Met deze rekenmethode kan straks onnodige vervanging van bouten in een reactorvat worden voorkomen.”

Overigens leidt het mogelijk falen van bouten in het binnenwerk van een reactorvat niet direct tot onveiligheid. “Het zijn er talloze, dit zorgt voor redundantie. Wanneer een bout scheurt, blijft de verbinding intact.” Ook in het ultieme geval van breuk zal de kop van de bout niet gaan ‘zweven’, hij zit met een las aan het binnenwerk vast.



Complexiteit van interacties tussen materialen, omgeving en spanningen in een werkende kerncentrale



Nikkel-legeringen onder de loep:

Materiaalonderzoek Molten Salt Reactor

De wereld heeft hoge verwachtingen van de gesmolten zout reactor. De ontwikkeling ervan vordert gestaag. "Startups over de hele wereld houden zich er mee bezig." Toch zal het nog een tijd duren voor de technologie gedemonstreerd kan worden. Ondertussen werkt NRG hard aan het onderzoek naar geschikte materialen voor het reactorvat.

De Nederlands-Cypriotische Kiki Naziris studeerde technische natuurkunde in Delft en werkt nu drie jaar bij NRG. Zij is verantwoordelijk voor het bestralings- en temperatuuronderzoek aan metaal-monsters die kandidaat zijn voor de Molten Salt Reactor.

"Een gesmolten zout reactor is drukloos. Wel werken ze met tweemaal zo hoge temperaturen als licht water reactoren zoals de Borssele." Bovendien is het zout een erg corrosief koelmiddel, in tegenstelling tot water. "Deze aspecten stellen dus bijzondere eisen aan het materiaal." Druk is geen issue, maar het materiaal moet wel tegen hoge temperaturen en straling kunnen in combinatie met de agressieve interactie met zout.

VERBROSSING

Kansrijk zijn nikkel-legeringen. "We weten dat ze zowel bestand zijn tegen zout als tegen hoge temperaturen." Ze zijn echter nog niet gekwalificeerd voor het gebruik in een nucleaire omgeving. "We weten dat als nikkel neutronenstraling absorbeert er helium vrijkomt. Dat leidt dan tot verbrossing van de legering."

Maar hóe en hóe snel gebeurt dat? En wat is de bijdrage van de temperatuur aan de degradatie? En wat die van straling? En hoe valt de vergelijking uit met roestvrijstaal (rvs)? Daarin komt immers minder helium vrij maar kent wel een ander probleem, corrosie: zout 'trekt' chroom uit het rvs-staal waardoor dit dus ook degradeert.

Eén van de tien drums die worden bestraald in de HFR

In elke drum zitten tien monsters die na bestraling zullen worden beproefd. Zo wordt het gedrag van de potentiële MSR-construictiematerialen onder neutronenstraling bij hoge temperaturen bestudeerd.



Kiki Naziris:

"Onze kennis moet leiden tot gekwalificeerde materialen voor de constructie van gesmolten zout reactoren."

TIEN MAAL ZEVEN

Inmiddels zijn ook al monsters in de Hoge Flux Reactor (HFR) geladen waar ze een jaar lang zullen worden bestraald. Tegelijkertijd zijn tien maal zeven monsters in een oven gedaan. Ze worden ongeveer net zo lang blootgesteld aan een temperatuur van zo'n 650 graden Celsius (de bedrijfstemperatuur van de MSR).

"In november en december 2022 komen de monsters uit respectievelijk de HFR en de ovens. In 2023 worden de vergelijkende onderzoeken naar de degradatie-mechanismen gestart."

De uitkomsten zullen iets (maar niet alles!) zeggen over de geschiktheid van de zeven kandidaten voor toepassing in gesmolten zout reactoren.

"We kunnen dan met heel veel slagen om de arm iets zeggen over het degradatieproces door temperaturen en straling in nikkel-legeringen en roestvrijstaal. En dat zegt iets over de geschiktheid van deze materialen."

Een disclaimer is wel op zijn plaats, vindt Naziris. Want er moet nog veel meer worden onderzocht, zoals de inwerking van het zout. "Daarom is het ook realistisch om rekening te houden met een lange ontwikkeltijd."

In het Amerikaanse Oakridge heeft zo'n vijftig jaar geleden korte tijd een gesmolten zout reactor gewerkt. "Te lang geleden en te kort van duur om voldoende data op te leveren," stelt Naziris. Het doen van experimenten en het vergelijken van alle effecten en hun voor- en nadelen is dus noodzakelijk. "Kennis die moet leiden tot gekwalificeerde materialen voor de constructie van een nieuwe demonstratie-reactor."

BESTRALING EN TEMPERATUUR LOSGEKOPPELD

Om weer nieuwe stappen te kunnen zetten in de ontwikkeling van de gesmolten zout reactor, trekt Naziris in haar onderzoek de temperatuur- en de neutronenbelasting uit elkaar. "Bestralen en temperatuuronderzoek vinden los van elkaar plaats in respectievelijk de Hoge Flux Reactor en in ovens. Zo worden de verschillende bijdragen helder." De invloed van zout valt voorlopig buiten dit onderzoek.

Inmiddels heeft NRG de 7 kandidaat-legeringen onderhanden genomen. Er zijn monsters gemaakt van 6 nikkel-legeringen en 1 roestvrijstaal-legering. Om de referentiesituatie vast te leggen, zijn inmiddels trek- en vermoeiingsproeven uitgevoerd op monsters van de kandidaatmaterialen.

Wat zijn de risico's van lozing radioactief koelwater Fukushima?

NRG rekende het uit

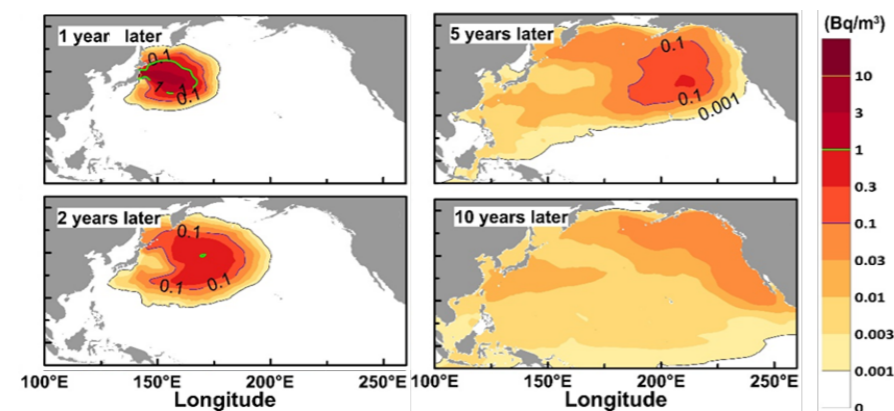
Op de site van de Japanse kerncentrale in Fukushima is in tanks anderhalf miljoen kubieke meter radioactief vervuild noodkoelwater opgeslagen. Het is de erfenis van het reactorongeluk na de beruchte zeebeving en de tsunami in 2011. De Japanse overheid heeft besloten het koelwater gedoseerd te lozen op de oceaan. De wereld reageert bezorgd. Hoe risicovol is dit? En waar komt de radioactiviteit uiteindelijk terecht? NRG rekende het uit.

Govert de With is als natuurkundige gespecialiseerd in stromingsmechanica. Om de impact van de voorgenomen lozingen te voorspellen, maakte hij gebruik van computersimulaties. Vooral het model POSEIDON bleek van grote waarde. De wereldzeeën zijn gemodelleerd als watercompartimenten met waterkolommen, waterbodems en waterleven. En er is in POSEIDON een schat aan monitoring- en meetgegevens ingebracht. "Er zit twintig jaar ontwikkelwerk in. Al sinds de ramp in Tsjernobyl wordt aan de verfijning van dit model gewerkt." De werking van POSEIDON is gevalideerd en het model heeft zijn sporen

verdiend. "Met dit model kunnen verdunningsprocessen, transport en neerslag in oceanen worden nagebootst. Zo bepaalden we de verspreiding van radioactiviteit vanuit Fukushima en berekenden de impact ervan op mens en milieu."

GOED NIEUWS

Rekenkundig kan Govert de With heel precies bepalen wanneer en hoeveel Fukushima-radioactiviteit ergens terechtkomt. De With: "Op zich goed nieuws. Door de verdunning van het verontreinigde Fukushima-water in de enorme oceaan, is de dosis voor mens en



Govert de With:

“ Hoewel de risico's nihil zijn, volgen omliggende landen de Japanse lozingsplannen met argusogen. ”

milieu zeer klein. Ze valt in het niet bij de van nature aanwezige radioactiviteit in zeewater.”

De With legt dit uit aan de hand van een concreet voorbeeld. "Wij hebben uitgerekend dat vijf jaar na de start van het lozen van het verontreinigde koelwater in Japan de eerste radioactiviteit aankomt op de westkust van de Verenigde Staten. Er zit op dat moment nog een fractie van 1 becquerel radioactiviteit in een kubieke meter zeewater."

Is dat verontrustend? "Als je beseft dat er van nature zo'n vijftig tot zestig becquerel radioactiviteit in een kubieke meter zeewater zit, kun je begrijpen dat het risico van deze extra toegevoegde fractie van een becquerel erg laag is."

VERDUNNING PLUS TEMPO

De lozingsplannen van de Japanse overheid zullen dus niet leiden tot grote ecologische effecten op het zeemilieu. "Anderhalf miljoen kubieke meter verontreinigd water klinkt als heel veel, maar valt in het niet in de onmetelijke oceaan." Naast verdunning speelt ook het lozingstempo een belangrijke rol. "De Japanse overheid trekt daar enkele tientallen jaren voor uit zodat de lozingen ook binnen de wettelijke toegestane jaarlimieten blijft." Overigens, de meeste radioactiviteit is inmiddels al door natuurlijk verval uit het te

lozen koelwater verdwenen. Het water staat immers al een decennium in opslag. Andere langer levende nuclides zijn er intussen ook al uitgefilterd. Het gaat dus om een restant radioactiviteit waar geen oplossing voor is. "Radioactieve stoffen die zich niet aan filters hechten en een lange vervaltijd hebben," legt De With uit. "Hoofdzakelijk de isotoop tritium." Dat straalt niet heel erg en heeft een halfwaardetijd van circa 12 jaar. "Het duurt daarvoor lang voor het vanzelf verdwijnt. Helaas is tritium op dit moment niet uit water te filteren doordat het zich exact hetzelfde gedraagt als water. Opslaan of lozen zijn dus de enige opties." Japan kiest dus voor gedoseerd lozen.

ARGUSOGEN

Hoewel de risico's dus eigenlijk nihil zijn, volgen omliggende landen de Japanse lozingsplannen met argusogen. De With beseft goed dat zijn positieve rekensom niet alle zorgen van de mensheid zal wegnemen. "Er rust een zware verantwoordelijkheid op de Japanse overheid om goed en transparant uit te leggen waarmee ze bezig zijn."

Ook waarschuwt De With dat je de geruststellende uitkomsten van dit Fukushima-onderzoek niet mag generaliseren naar andere locaties en situaties. "Stel dat je dit Fukushima-koelwater op de Rijn of de Maas zou lozen, dan zou dat tot totaal andere uitkomsten leiden en kunnen de risico's veel hoger zijn. Rivieren en oceanen zijn onvergelykbare watersystemen."

Aanvullende validatie energieconversiesysteem Benchmark Computercode voor Hoge Temperatuur Reactor

Kleine, modulair uitbreidbare kerncentrales (SMRs, Small Modular Reactors) staan volop in de belangstelling. Ze zullen waarschijnlijk een deel van de oplossing zijn voor een soepele omschakeling naar een klimaatneutrale stabiele energiehuishouding rond 2050. NRG maakt daarom haar computercode SPECTRA geschikt voor het nabootsen van thermo-hydraulische processen in verschillende types SMRs. Daaronder ook de gasgekoelde hoge temperatuur reactor.

De zogenaamde HTR (Hoge Temperatuur Reactor) is een beproefd ontwerp waar nu opnieuw aandacht voor is. De splijtstof zit achter verschillende beschermlagen in grafiet; koeling gebeurt met een gas. Er bestaan grofweg twee verschillende types: één type waarin de splijtstof in grafietblokken is ingebed en één type waarin de splijtstof in grafietballen is ingebed. Bij die laatste gaat het eenvoudig gezegd om een grote bak met grafietballen met daarin uranium splijtstof die gekoeld wordt door (onbrandbaar) heliumgas. “Dit heliumgas stroomt langs de ballen, expandeert en drijft direct een turbine aan.

Het gaat via koelers weer terug het proces in. Een compact en veilig reactorconcept.” Aan het woord is Fajar Pangukir. De van oorsprong Indonesische reactor koeling expert kwam enkele jaren geleden na haar studie in Pisa bij NRG als trainee (weer) in aanraking met het vak van thermo-hydraulisch modelleren. Ze vond het zo interessant, dat ze er mee verder wilde.

FOCUS OP GEAVANCEERDE REACTOREN

“SPECTRA is een computercode die door NRG zelf is ontwikkeld. Omdat de code relatief nieuw op de markt is, moet hij concurre-



Fajar Pangukir:

“ De benchmark komt precies op het moment dat de wereld opnieuw belangstelling krijgt voor de HTR. ”

MISSIE GESLAAGD

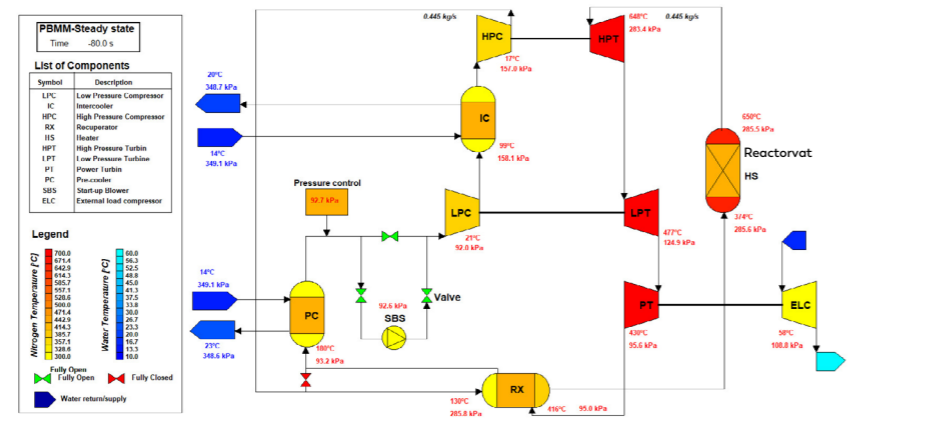
De IAEA-publicatie van 2013 werd voor Fajar Pangukir dus de toetssteen voor de SPECTRA-model-resultaten. Pangukir benchmarkte de totale simulatie van de reactor. “Zeg maar op het volledige functioneren van het integrale complexe thermische vloeistof-systeem met daarin meerdere warmte-wisselaars, compressoren en turbines.” Conclusie: “De resultaten van SPECTRA zijn goed te vergelijken met de originele experimentele resultaten.” Missie geslaagd dus. En dat precies op het moment dat de wereld opnieuw belangstelling krijgt voor de HTR.

“Het voordeel van dit concept is dat het werkt met enorm hoge temperaturen. Bij licht water reactoren wordt stoom gemaakt bij een temperatuur van ongeveer 300 graden Celsius. Bij een HTR praat je over 600 tot zelfs 1000 graden Celsius.” Dat maakt de HTR reuze efficiënt en multi-inzetbaar en dus erg interessant voor (industriële) toepassingen waar zowel hoge temperaturen als elektriciteit belangrijk zijn.

Een van de landen die al ver waren met de ontwikkeling van de HTR, is Zuid-Afrika. Toen dit land vanwege gebrek aan belangstelling in 2009 stopte met deze ontwikkeling, bleef er echter wel een interessante erfenis over. “Vooruitlopend op een heuse demonstratiereactor bouwden de Zuid-Afrikanen namelijk een test-faciliteit waarin zij experimenten uitvoerden,” legt Pangukir uit. De resultaten daarvan werden in 2013 door de IAEA gepubliceerd. “Ik kon bijna 10 jaar later voor de benchmark dus nog dankbaar gebruik maken van deze Zuid-Afrikaanse praktijkresultaten.”

Met het gebenchmarkte SPECTRA-model kan NRG een belangrijke bijdrage leveren aan de verdere ontwikkeling van de HTR. “Met behulp van SPECTRA zullen reactor-ontwerpers veiligheidsanalyses op een betrouwbare gevalideerde manier kunnen uitvoeren en oplossingen gaan vinden voor praktische problemen die met de hoge temperaturen in deze gasgekoelde reactor samenhangen,” stelt Pangukir. “Materialen in turbines en compressoren zullen immers bestand moeten zijn tegen temperaturen tot wel 1000 graden Celsius!”

Schema van de stationaire toestand van een HTR reactorvat in SPECTRA en de verschillende systemen daar omheen waarmee de energie wordt omgezet in elektriciteit en proceswarmte.



High-fidelity Direct Numerical Simulations

Het onzichtbare zichtbaar

Veilige kernenergie draait om het afvoeren van de extreem hoge temperaturen van kernsplijting rond de splijfstofstaven. Dat gebeurt door koelmiddel langs bundels splijfstofstaven te sturen. Dat gaat gepaard met hevige turbulenties. Daardoor is de warmteoverdracht geen geleidelijk en homogeen proces. Het in detail simuleren van dit proces was tot voor kort onbegonnen werk. NRG heeft een oplossing: high-fidelity Direct Numerical Simulations (DNS).

Als koelmiddel brengt water de primaire warmte over op het secundaire systeem waar stoom wordt geproduceerd voor de elektriciteitsopwekking. Natuurkundige Akshat Mathur is specialist op het gebied van vloeistofdynamica (fluid dynamics).

Als geen ander kent hij het grillige verloop van warmteoverdracht in de reactor van een kerncentrale. "Die warmteoverdracht verloopt niet uniform. Zij is vanwege alle turbulenties zeer dynamisch."



Akshat Mathur:

“ Alles draait bij kernenergie immers rond de afvoer van warmte ”

normale reactoromstandigheden weer sterk van ongevalsomstandigheden. Kortom: aan variabelen geen gebrek.

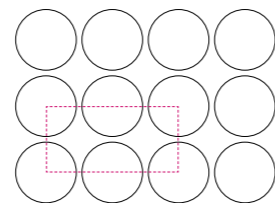
BESTAANDE MODELLEN VERBETEREN

“Tot op heden zijn al deze processen niet te simuleren met behulp van de bestaande praktische computermodellen”, legt Mathur uit. Bestaande modellen zijn geschikt binnen de condities waarbinnen reactoren bedreven worden. Met verbeterde modellen kan het toepassingsgebied groter gemaakt worden waardoor reactoren optimaler kunnen opereren (langere cyclus, hogere temperaturen). “Het ontbreekt aan data waarmee we die

De warmteafgifte gaat gepaard met grote fluctuaties en is sterk afhankelijk van het gedrag van koelmiddel dat wordt beïnvloed door het ontwerp van de kern. In een toekomstige reactor die mogelijk gekoeld wordt met vloeibaar lood, is dat totaal anders dan in een watergekoelde reactor. Ook verschillen de

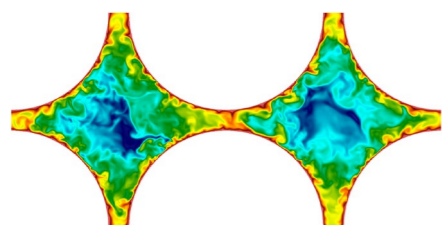
Bundel splijfstofstaven

De rode lijn markeert de uitsnede uit de bundel die is gesimuleerd.



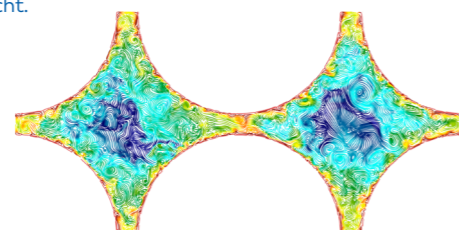
Warmteoverdracht in turbulent koelmiddel (water)

Rood is heet, donkerblauw koel.



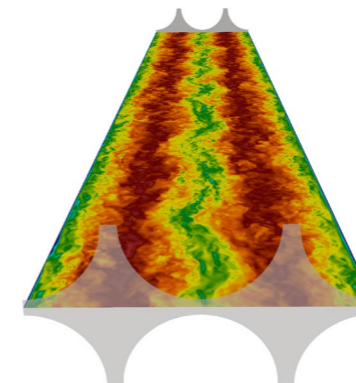
Momentopname van het turbulentiepatronen tussen splijfstofstaven

Het zeer turbulente karakter van koelmiddel is goed zichtbaar (golvend patroon) in combinatie met de niet-uniforme warmteoverdracht.

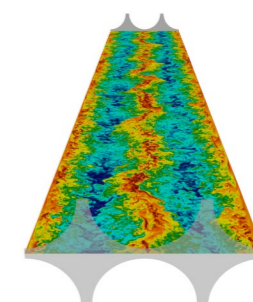


Momentopname van de snelheid waarmee koelmiddel tussen de staven heen stroomt

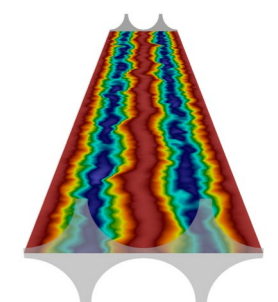
De vorm die de turbulentie hier aanneemt, is input voor ontwerpers voor veilige (trillingvrije) splijfstof-elementen.



Warmteoverdracht in een watergekoelde reactor



Warmteoverdracht in een metaalgekoelde reactor



In één oogopslag is duidelijk dat metaalkoeling de warmte veel efficiënter afvoert dan waterkoeling.

bestaande praktijkgerichte modellen kunnen valideren.” Dat betekent tot op heden dat bij het ontwerpen van een reactorkern vooral werd teruggegrepen op praktijkervaringen: wat werkt wel en wat werkt niet?

“De turbulenties in het koelmiddel in de kern bepalen de efficiëntie van de warmteoverdracht door de vermenging van warm en koud koelmiddel. Tegelijk zouden turbulenties kunnen leiden tot ongewenste trillingen. Om de robuustheid te verhogen wil je tot in detail kunnen zien en snappen hoe turbulent koelmiddel zich rond de splijstofelementen gedraagt.”

REKENKRACHT

De oplossing zijn hoge resolutie simulaties. “Probleem daarbij is dat die heel veel rekenkracht vragen. Teveel om daar de gewenste praktijksituaties mee te simuleren,” legt Akshat Mathur uit. “Dan zou je voor iedere afzonderlijke situatie maanden of jaren aan het rekenen zijn.”

De oplossing vond NRG door een éénmalige grootschalige hoge resolutie Direct Numerical simulatie te doen. Andere modellen kunnen vervolgens gebruik maken van de resultaten.

Samen met het rekencentrum van het Poolse onderzoeksinstituut NCBJ wist NRG spectaculaire reken capaciteit te mobiliseren. Met behulp van 160 miljoen CPU-uren (oftewel twee jaar lang 10.000 rekenprocessoren) werden met een resolutie van maar liefst 630 miljoen punten de turbulentie en de warmteoverdracht in beeld gebracht. “Omdat de simulatie geen vaste dimensies

kent, kan hij worden ‘opgerekt’. Je kunt, bij wijze van spreken, de turbulentie simuleren rond splijstofstaven met een doorsnede van 1 centimeter, maar ook rond staven van 10 centimeter.” Het was de grootste thermo-hydraulische rekenopgave die ooit in Polen is uitgevoerd.

IN ÉÉN OOGOPSLAG

Het resultaat is ronduit spectaculair: in één oogopslag wordt real time zichtbaar wat er in de reactor rond de splijstofstaven gebeurt. “Zowel voor water- als metaalkoeling. We simuleerden in één keer alles wat tussen de grootste (integrale) schaal en de allerkleinste schaal zit.” Zeg maar: alles tussen één meter en één micrometer. “Dit leverde zoveel data op, dat daarmee de andere, meer praktische simulatieprogramma’s kunnen worden verbeterd.” Hier wordt in 2022 een begin mee gemaakt.

Ook gaan de visualisaties helpen om het gedrag van koelmiddel beter te begrijpen. “Als we de frequentie van de trillingen in de kern beter snappen, hebben we daarmee de sleutel in handen om de robuustheid van nieuwe ontwerpen te verhogen.” Als de faalkans van splijstofelementen door trillingen verder kan worden verkleind, leidt dat tot meer veiligheid bij minder kosten. En omdat ook de afgifte en distributie van warmte beter wordt begrepen, zal dat ook leiden meer efficiëntie en dus goedkopere kernenergie. “Alles draait bij kernenergie immers rond de afvoer van warmte.”

Stagiaires en afstudeerders bij NRG

NRG biedt studenten van Nederlandse onderwijsinstellingen de mogelijkheid kennis te maken met nucleair onderzoek en een bijdrage te leveren aan het onderzoeksprogramma. Dat kan in de vorm van een stage, een bachelor- of masterscriptie of een promotie.

Geïnteresseerde studenten en/of hun begeleiders kunnen contact opnemen met NRG over de mogelijkheden en opties.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de stages en onderzoeken (bachelor, master, promotie) in 2021. Hierbij moet opgemerkt worden dat normaliter ook de nodige buitenlandse studenten en stagiaires werkzaam zijn bij NRG. Door de reisbeperkingen als gevolg van de coronamaatregelen is dat aantal in 2020-2021 sterk teruggelopen. Inmiddels zijn de eerste, nieuwe buitenlandse studenten weer begonnen met hun werkzaamheden bij NRG.

Overzicht van afgeronde stages en onderzoeken (bachelor, master, promotie) in 2021

| | ONDERWIJS-INSTELLING | ONDERWERP |
|----------|----------------------|--|
| Stage | TU Delft | CFD Simulation for the Development and Analysis of Nuclear Reactor Components |
| Stage | TU Delft | Optimization for irradiation thermo-mechanical models |
| Stage | TU Delft | Numerical Investigation of Vortex-Induced Vibration |
| Bachelor | VU Amsterdam | Investing in Nuclear Reactors: The Influence of the Discount Rate |
| Bachelor | Hogeschool InHolland | Accuracy of the newly developed technique for determination of the Tc-99 content of waste |
| Master | TU Delft | Design of a Direct Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in a T-junction |
| Master | Universiteit Utrecht | Identifying the economic potential of nuclear energy in a system where wind, solar and green hydrogen dominate |
| Master | TU Delft | Simulation of two-phase stratified turbulent flows using Basilisk |
| Master | Cranfield University | Investigation of premixed combustion modelling in LES |
| Master | TU Eindhoven | Development of coalescence and break-up modeling in LogMoM |
| Master | TU Delft | URANS simulations for fluid-structure interaction of cylinders in cross-flow |
| Master | TU Delft | Numerical modeling of hydrogen turbulent combustion for nuclear safety management |
| Master | TU Eindhoven | Development of sub-grid models for bubble coalescence in Basilisk |
| Master | Utrecht University | Public opinion on nuclear energy in Europe, 1970 – 2018 |
| Promotie | Wageningen, TU Delft | Guidance in the use of the reactive transport model in the OPERA code |
| Promotie | TU Delft | Helium-bubbling experiments and thermochemistry of molten salts |

Overzicht van stages en onderzoeken (master) die worden afgerond in 2022

| | ONDERWIJS-INSTELLING | ONDERWERP |
|--------|---|---|
| Stage | TU Twente | Quantative comparison of crack growth solutions of different international guidelines |
| Master | TU Delft | CFD study on the influence of oxide layers on turbulent heat transfer in nuclear applications |
| Master | TU Delft | Development and validation of an anisotropic pressure fluctuation model for the prediction of turbulence induced vibrations |
| Master | Sant'Anna school of advanced studies - Pisa | Modelling of the temperature distribution in the RPV wall during a cooling transient |

Nuclear. For Life.



www.nrg.eu