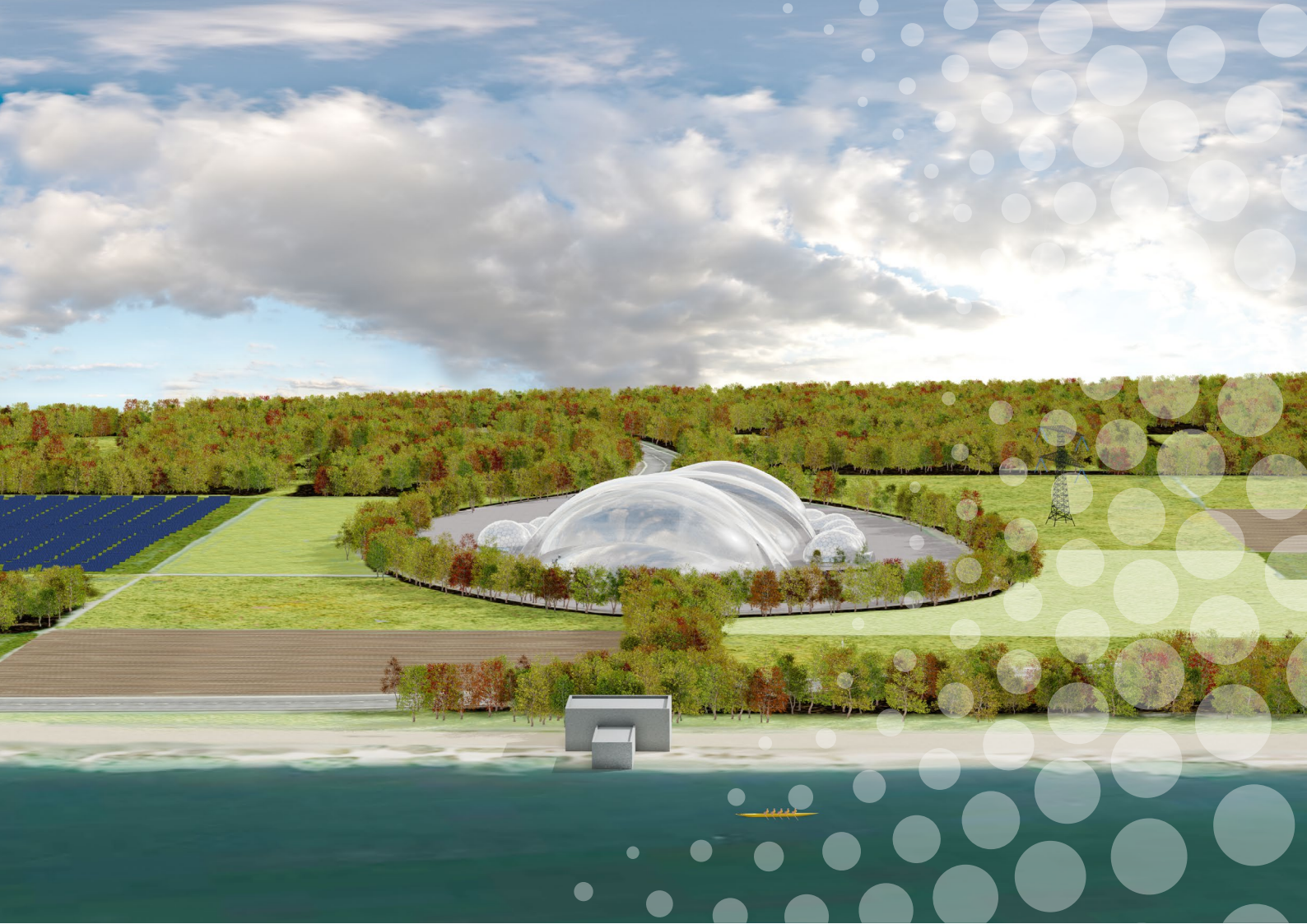




Onderzoeksjaarverslag NRG 2022

Nucleaire professionals aan het woord



Nuclear. For life.



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.

Inhoud

Voorwoord – Bertholt Leeftink, CEO NRG PALLAS	4
Blijft bij een kernongeluk de gesmolten kern in het reactorvat? – Daniele Dovizio	6
Voorspellen en voorkomen van vervuiling met natuurlijke radioactiviteit – Govert de With en Stefan van der Sar	8
NRG werkt aan een betere voorspelbaarheid van trillingen – Kevin Zwijzen	10
Hoe kan kernenergie bijdragen aan de energietransitie? – Gilliam van Oudenaren en Jelle Oving	12
Grote belangstelling voor Small Modular Reactors – Paul Breijder	14
Fire-PSA: verbetermogelijkheden brandpreventie inventariseren en waarderen – Jacoline Hanekom en Rolf Langius	16
Proeven van nucleaire energie én nucleaire geneeskunde – Sem Leftin	18
NRG combineert vloeistofdynamica met breukmechanica – Francesco Brigante	20
Real time inzicht én voorspellen van conditie radioactief afval – Hans Meeussen en Bas Janssen	22
Onderzoek naar zout en legeringen Thorium-gesmoltenzoutreactoren – Konstantin Kottrup	24

Afbeelding cover: Artist impression van een small modular reactor (SMR)

NRG, 2.6283/23.274715; november 2023

Voorwoord:

Aandacht voor nucleaire technologie is terug van weggeweest

Op het moment dat ik dit voorwoord schrijf, midden in de verkiezingscampagne, gaat er geen dag voorbij zonder aandacht voor kernenergie in de media. En niet zonder reden: we moeten alle opties beschouwen om ervoor te zorgen dat we in 2050 de klimaatdoelen van Parijs gehaald hebben. De beste manier waarop wij vanuit NRG|PALLAS een bijdrage kunnen leveren is door op basis van onze nucleair-technologische kennis, thema's te agenderen en objectief en onderbouwd overwegingen en dilemma's in kaart te brengen.

De hernieuwde interesse in kernenergie doet daarmee een beroep op de kennisdragers in de samenleving. De plannen van de overheid voor de bouw van nieuwe kerncentrales vragen om de ontwikkeling van nieuwe kennis om de plannen te kunnen realiseren. Daarom hebben NRG, TNO en de TU Delft het afgelopen jaar de krachten gebundeld en gezamenlijk een kennisagenda opgesteld. Want alleen door samenwerking en krachtenbundeling halen wij het beste uit onszelf en uit elkaar.

Maar het gaat de komende jaren niet alleen om het verwerven van nieuwe kennis, het gaat vooral ook over het opleiden van nieuwe medewerkers voor de nucleaire sector. Hier ligt een grote uitdaging, maar tegelijkertijd ook een kans voor studenten van het MBO, HBO en de universiteit. Om de ambities van de overheid te kunnen realiseren zijn veel nieuwe medewerkers nodig. Het besef dat nucleaire technologie een bijdrage kan leveren aan het oplossen van grote maatschappelijke vraagstukken op het gebied van energie en klimaat, maar ook op het gebied van de gezondheidszorg, oefent gelukkig en grote aantrekkingskracht uit op jongen mensen die geïnteresseerd zijn om met uitdagend en (maatschappelijk) relevant werk een bijdrage aan een betere wereld te leveren. Deze jonge mensen worden tijdens hun studie graag uitgedaagd en werken dikwijls aan innovaties en nieuwe ontwikkelingen, waarmee ze kennis en

ervaring opdoen die ze in de praktijk kunnen inzetten.

Al sinds de jaren '60 van de vorige eeuw ontwikkelt NRG nucleaire kennis voor de overheid en de nucleaire sector. Kennis die nodig is voor een veilige toepassing van nucleaire technologie. Kennis en expertise zijn ook nodig om te kunnen werken aan nieuwe toepassingen van kernenergie. Een goed voorbeeld is de ontwikkeling van *small modular reactors*, relatief kleine kernreactoren die in de toekomst mogelijk een bijdrage gaan leveren aan het klimaat-neutraal maken van niet alleen de elektriciteitsproductie maar ook bijvoorbeeld energie-intensieve industrieën. En wat zijn de mogelijkheden voor de productie van waterstof met gebruikmaking van kernenergie?

In dit jaarverslag vertellen onze onderzoekers over hun bijdrage aan de ontwikkeling van nucleaire kennis en expertise. Het verslag laat zien hoe breed en gevarieerd het nucleaire onderzoek is. De ontwikkeling van kennis en expertise op het gebied van nucleaire veiligheid is uiteraard een belangrijk thema. De toegenomen rekenkracht van computersystemen maakt het mogelijk om het verloop van processen in een reactor steeds nauwkeuriger te modelleren. En net als in andere sectoren worden kunstmatige intelligentie en machine learning hierbij steeds belangrijker.



Daarnaast geeft het programma ruim baan aan experimenteel onderzoek, zoals rond de gesmolten zoutreactor want uiteindelijk zijn experimentele data nodig om modellen te toetsen en te valideren. Een nieuwe activiteit betreft de zogeheten scenariostudies, studies die inzichtelijk maken op welke wijze kernenergie kan bijdragen aan het realiseren van de klimaatdoelen in 2050. Het onderzoek op het gebied van geothermie laat tenslotte zien dat het belang van nucleaire kennis niet alleen beperkt blijft tot kernenergie.

Nucleaire technologie heeft de wind in de zeilen en dat is terecht. Niet omdat nucleaire technologie een wondermiddel is, wél omdat nucleaire technologie bijdraagt aan een betere wereld. Met dit onderzoeksprogramma leggen wij een fundament voor kennis en expertise en dragen wij op die manier bij aan een weloverwogen afweging van keuzes, zodat die keuzes niet worden gemaakt op basis van meningen en dogma's, maar op basis van goed onderbouwde analyses.

*Bertholt Leeftink,
CEO NRG|PALLAS*

Bertholt Leeftink:

*“ Nucleaire technologie
draagt bij aan een betere wereld. ”*

Blijft bij een kernongeluk de gesmolten kern in het reactorvat?

Als bij een ongeluk in een kerncentrale de kern smelt, is alles erop gericht om de radioactieve stoffen binnen het containment te houden. Eén van de oplossingen is In-Vessel Melt Retention (IVR). Een reactorvat is dan op specifieke plekken zo sterk, dat het niet bezwijkt onder de enorme hitte van de gesmolten kern. Daarmee neemt het risico op verspreiding van radioactiviteit naar de omgeving enorm af.

“Voor kerncentrales met een wat lager vermogen is IVR bewezen, voor hoge vermogens is de techniek veelbelovend.”

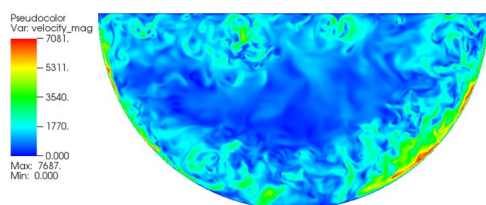
Daniele Dovizio is specialist stromingsleer. Hij simuleerde bij NRG op hoge resolutie een kernsmeltongeluk waarbij de inventaris op de bodem van een reactorvat terechtkomt. Met de data uit deze complexe simulatie kan vervolgens het minder complexe ‘handgereedschap’ van de ontwerper worden gevalideerd.

Tijdens een kernsmeltongeval ontstaat er een smeltbad van uraniumdioxide, zirconiumdioxide en roestvrij staal op de halfronde bodem van een reactorvat. De enorme hitte van de vervalwarmte van de splijtingsproducten tast het reactorvat aan. Natuurlijk wil je weten het reactorvat onder geen enkele omstandigheid de kernsmelt door laat. Uiteraard is experimenteren met kernsmelt om voor de hand liggende redenen niet mogelijk.

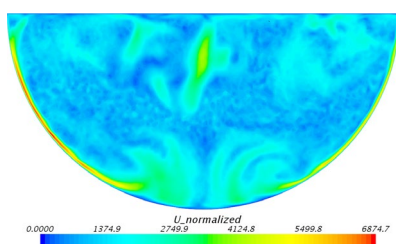
Snelheidsveld

Blauw: lage snelheden / Rood: hoge snelheden

DNS resultaat met 400-miljoen punten:



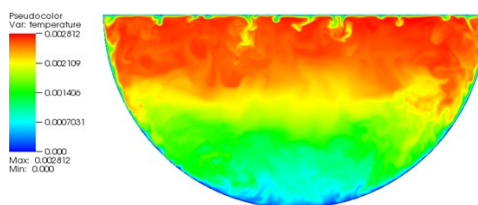
RANS resultaat met 3-miljoen punten:



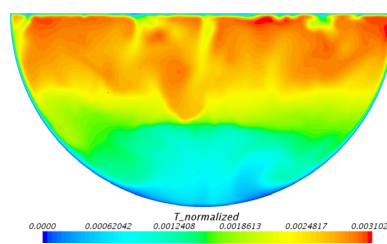
Temperatuursveld

Blauw: relatief lage temperaturen / Rood: hoge temperaturen

DNS resultaat met 400-miljoen punten:



RANS resultaat met 3-miljoen punten:



Daniele Dovizio:

“ Met CFD kun je berekenen onder welke ongevalsomstandigheden het vat heel blijft. ”



“Om ook zonder experimenten zeker te kunnen weten of een reactorvat heel blijft, simuleert de ontwerper in de computer allerlei ongevalsscenario's met Computational Fluid Dynamics (CFD) berekeningen.”

Deze berekeningen kennen drie niveaus. Het liefst zou je natuurlijk alle ongevalsscenario's op het hoogste detailniveau willen simuleren: Direct Numerical Simulation. Dovizio: “DNS geeft een uiterst realistische simulatie en vereist geen modellering. Probleem is dat dit ook uiterst kostbaar en tijdrovend is.” Second best is de Large Eddy Simulation (LES). Vanwege efficiency, snelheid en flexibiliteit simuleert de industrie ongevalsscenario's echter voornamelijk met niveau-drie-berekeningen. “Een Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS-) berekening duurt weken tot maanden, een DNS-berekening weken” legt Dovizio uit. “Echter, met een RANS-berekening zijn fluctuaties van snelheid en druk in de stroming niet te voorspellen.”

Om de bestaande RANS-methodes te kunnen valideren, zocht Daniele Dovizio samenwerking met de technische universiteit van Stockholm (KTH). “Die beschikt over de benodigde super-computer met meer dan 2.000 processoren.”

NRG deed eerst een eigen RANS-simulatie met in totaal 4 miljoen punten van een gesmolten reactorkern op een halfronde vatbodem.

Daarna deden de Zweden een hoge resolutie DNS-simulatie van dezelfde situatie met 400 miljoen punten. Dat leverde zoveel data op dat die alleen fysiek op een harde schijf van Stockholm naar Petten kon worden overgebracht. “Mijn Zweedse collega maakte er maar een leuk uitstapje van,” glimlacht Daniele Dovizio.

Uit een vergelijking van de twee berekeningen blijkt dat ook het RANS-model dat NRG toepaste een representatieve simulatie maakte van wat er zich tussen de gesmolten kern en de halfronde vatbodem afspeelt. “Daarmee is de RANS-methode gevalideerd en kan de industrie er representatief talloze ongevalsscenario's mee doorrekenen.” Iets wat met DNS onhaalbaar is.

Voor alle vergunde kerncentrales tot 1.000 MW staat intussen wel vast dat IVR goed werkt en dat het reactorvat onder alle omstandigheden heel blijft. “Voor de grote 1.500 MW kerncentrales is er nog rekenwerk te verrichten, daar kan deze validatie goed aan bijdragen. Ook voor toekomstige centrales is dit waardevol.”

En wat als het reactorvat toch bezwijkt? “De nieuwe generaties kerncentrales beschikken ook nog over een zogenaamde ‘core-catcher’. Dat is een grote betonnen bak die de kern opvangt.” Ook aan het simuleren wat zich daarin afspeelt wordt door NRG gewerkt.

Aardwarmte:

Voorspellen en voorkomen van vervuiling met natuurlijke radioactiviteit

Met aardwarmte kun je gebouwen en tuinbouwkassen duurzaam verwarmen. Daarom stimuleert het ministerie van EZK het gebruik van aardwarmte met subsidies. De verwachting is dat de toepassing daardoor sterk toeneemt. NRG ontwikkelde een rekenmodel dat voorspelt of en hoeveel natuurlijke radioactiviteit uit de diepe aarde met de aardwarmte mee naar boven komt. “Ook hebben wij laten zien dat kunststofbuizen minder gevoelig zijn voor radioactieve vervuiling dan stalen pijpen.”

“Vanuit een diepte van vaak meer dan duizend meter wordt warm water opgepompt,” legt Govert de With van NRG uit. “Dit water heeft een temperatuur van ongeveer 90° Celsius waaraan in een warmtewisselaar warmte onttrokken wordt. Daarna wordt het (afgekoelde) water weer terug in de bodem gebracht.”

Een mooie oplossing met één zorgpuntje. Samen met zijn collega Stefan van der Sar houdt De With zich bezig met Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). “Dat is radioactiviteit die van nature in de bodem zit en zich bijvoorbeeld ophoopt in installaties die we gebruiken voor aardwarmte.” NORM is daarmee dus ook een onvermijdelijk bijproduct van de geothermie.

Stefan van der Sar: “Als je met lange buizen het warme water uit de bodem omhooghaalt, neem je ook allerlei stoffen die mineralen kunnen vormen, mee. Die zullen zich onder bepaalde omstandigheden afzetten in de installatie.” Heel langzaam slijt die dus dicht, een proces dat scaling wordt genoemd.

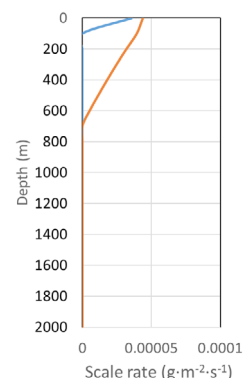
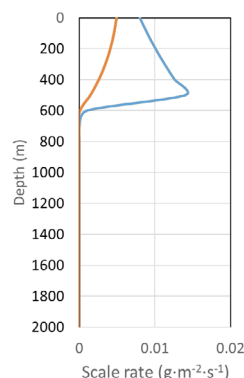
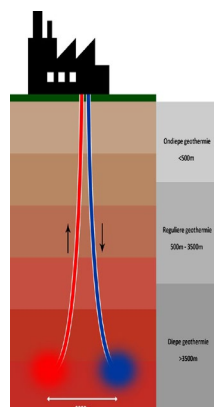
“Het vervelende is dat die afzettingen ook sporen van radioactiviteit bevatten. En die hopen zich dus ook op.”

Ga je de installatie vervolgens schoonmaken, dan zit je dus met radioactiviteit. “Je moet dan allerlei voorzorgsmaatregelen nemen en het natuurlijke radioactieve afval opslaan. Dat is duur.”

Gemodelleerde snelheid van afzetting van NORM-houdende mineralen in een geothermie installatie (links).

Bij het oppompen van het warme water betreft dat CaCO_3 (calciumcarbonaat; midden), bij het injecteren van het afgekoelde water BaSO_4 (bariumsulfaat; rechts). De berekeningen tonen dat de snelheid van afzetting tijdens injecteren trager verloopt dan tijdens het oppompen.

— snelle afzetting — langzame afzetting





Govert de With en Stefan van der Sar:

“ NRG heeft laten zien dat kunststofbuizen minder gevoelig zijn voor radioactieve vervuiling ”

Het zou dus mooi zijn als je de afzetting van NORM in aardwarmte-installaties zou kunnen voorspellen of zelfs voorkomen. De With: “Voorspellen is best complex omdat scaling heel situatie-afhankelijk is. De samenstelling van het water is per bodem verschillend en je hebt bovendien te maken met de specificaties van de installatie.” Want onder andere de gladheid van de buizen, de oppervlakte-energie en de hardheid van het gekozen materiaal spelen een rol. “En verder zijn er nog variabelen zoals veranderende temperatuur en druk die de chemische processen in het ‘aardwater’ beïnvloeden.”

“Dit is een typisch vraagstuk waarbij een computermodel kan helpen,” stelt Van der Sar. “Wij hebben met de door een NRG collega ontwikkelde rekentool ORCHESTRA een model gemaakt met al deze variabelen.” Niet alleen de chemische samenstelling van het water en de specificaties van de installatie. Ook het temperatuur- en drukverloop van het water op zijn lange reis door de installatie uit de bodem naar boven en weer terug. “Omdat we de hele installatie opdelen in compartimentjes kunnen we voor elk installatiedeel voorspellen wat de scaling zal zijn.”

Zo maakt NRG inzichtelijk of er in een bepaalde situatie een NORM-probleem kan ontstaan en op welke plek. “Soms is dat in de warmte-wisselaar, maar scaling kan bijvoorbeeld ook tot problemen leiden op de plek waar het water wordt teruggebracht in de bodem.”

Met deze kennis kan de leverancier dus vooraf maatregelen bedenken. Eén van die maatregelen is bijvoorbeeld de keuze voor kunststofbuizen in plaats van traditioneel staal. De With: “Er was al een vermoeden dat kunststofbuizen minder gevoelig zijn voor scaling en NORM dan staal. Maar de industrie was daar niet helemaal zeker van.”

Van der Sar: “Met ons rekenkundig model is nu aangetoond dat kunststofbuizen tot tien keer minder last kunnen hebben van scaling.” En minder afzetting betekent dus ook minder NORM.

Eenvoudig uitgelegd blijkt dat kunststof als een soort trampoline werkt. “Mineralen die zich willen afzetten tegen de wand, worden als het ware teruggeveerd,” aldus Van der Sar. Met andere woorden: radioactiviteit die je uit de aarde oppompt, kun je met kunststofbuizen ook weer terugbrengen in de bodem. “Hierdoor voorkom je dus ophoping van natuurlijke radioactiviteit uit de aardkost in de installatie,” constateert Govert de With. “Daarmee is het model ook nuttig voor het voorspellen van mogelijk radioactieve afzettingen in installaties in de proces- en nucleaire industrie.”

Trillingen grote oorzaak schades kerncentrales

NRG werkt aan een betere voorspelbaarheid van trillingen

De wisselwerking tussen (koel)vloeistof en reactorcomponenten is een bekend probleem in kerncentrales. Fluid-Structure Interaction (FSI) kan leiden tot trillingen die ernstige schades kunnen veroorzaken. “Als we trillingen goed kunnen voorspellen, kan ongeplande stilstand worden voorkomen.”

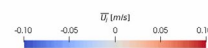
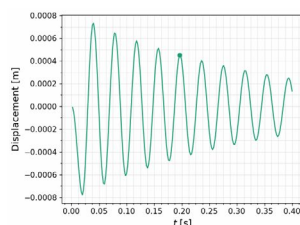
Fluid-Structure Interaction is wereldwijd één van de belangrijkste veroorzakers van schade in kerncentrales. De San Onofre-kerncentrale (USA) werd tien jaar geleden getroffen door FSI-scheurtjes in de stoomgeneratoren terwijl deze net waren vervangen. De lange buizen barstten door de vibraties onder hoge druk open. “De hoge kosten van de reparatie en de juridische procedure hebben de exploitant uiteindelijk doen besluiten om de centrale te sluiten.”

Kevin Zwijsen is FSI-specialist bij NRG en houdt zich bezig met de ontwikkeling van modellen die dit soort vibraties kunnen voorspellen. “Niet alleen warmtewisselaars, maar ook splijtstofbundels zijn er gevoelig voor. Bij schade door trillingen kan ook de splijtstofomhulling open-

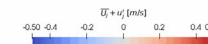
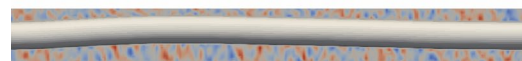
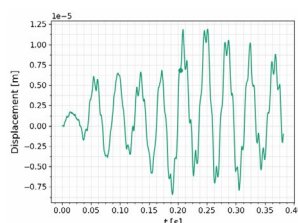
gaan. Dan komt de radioactieve inhoud in het koelmiddel terecht.”

De wereld is daarom naarstig op zoek naar methodes die trillingen door FSI goed kunnen simuleren. Zwijsen werkt aan de koppeling van CFD-modellen voor gas- en vloeistofstromen aan modellen van componenten in de kerncentrale. Omdat simulaties hoge rekenkosten met zich meebrengen, werd tot voor kort voornamelijk gerekend aan relatief eenvoudige opstellingen met slechts één of twee staven of buizen. “NRG werkt aan goedkopere rekenmethodes, gebaseerd op statistische gegevens. Daarmee kan dan ook aan complexere structuren gerekend worden.”

Een trillende staaf in een vloeistof. Boven een standaard FSI-simulatie. De trilling neemt in de tijd af omdat in dit model de trilling niet ‘op gang’ wordt gehouden.



Onder de realistische en preciezere ani-PFM simulatie: de trilling neemt toe en af; afhankelijk van de fluctuaties. Ook vervormt de staaf volledig anders door de ingebouwde variaties.





In augustus 2023 presenteerde Kevin Zwijsen de resultaten van aniPFM simulaties uit 2022 op de NURETH-20 conferentie te Washington, D.C. (USA). Dit is voor thermo-hydraulica in de nucleaire sector de grootste en belangrijkste conferentie. Er waren ongeveer 600 presentaties waarvan de meest baanbrekende werden beloond met een Best Paper Award. De bijdrage van NRG over AniPFM was één van de acht winnaars.

Zwijsen bouwde met zijn collega's het geavanceerde Pressure Fluctuation Model (PFM). Daarin werd eerst alleen een axiale (parallelle stroming langs een buis gemodelleerd. "We toonden aan dat dit PFM-model vibraties in structuren kon voorspellen." Hoewel de eerste resultaten bemoedigend waren, waren ze nog niet precies genoeg. In 2021 werd het PFM-model daarom verbeterd en uitgebreid met meer variatie in stromingen: aniPFM. Ani staat voor anisotroop. Een anisotroop model laat toe dat de fluctuaties van de stroming verschillend kunnen zijn in verschillende richtingen, bijvoorbeeld anders in de richting van de stroming dan in de richting loodrecht daar op.

In 2022 werd aniPFM gebenchmarkt op de resultaten van een experiment van het Zweedse Vattenfall. "Deze tests toonden aan dat de uitkomsten van de verbeterde aniPFM goed overeenkomen met de praktijk," vertelt Zwijsen. Omdat het toch nog nodig bleek om rekenkracht te beperken, onderschatte het model trillingen met zo'n 15 procent. "Hoewel dit een hele verbetering was en ook als acceptabel werd beschouwd, geeft dit ook aan dat er nog steeds wat te verbeteren valt."

Kevin Zwijsen:

“ NRG werkt aan goedkopere rekenmethodes die ook ingezet kunnen worden bij complexere structuren. ”

Naast de ontwikkeling ervan draagt NRG dus ook bij aan internationale benchmarking van Fluid-Structure Interaction-modellen. De activiteiten worden bovendien door NRG gecoördineerd. De benchmark van een ander FSI-model (zonder aniPFM) ging aan de hand van een Frans experiment met een pijpbundel in een stoomgenerator. "Hier lukte het niet om de opgetreden trillingen adequaat te simuleren. Ze werden sterk overschat." De conclusie was dat de overschatting waarschijnlijk inherent is aan de gehanteerde numerieke methode.

Al met al lijkt het er op dat er een duidelijk verschil zit tussen FSI-simulaties mét en zónder aniPFM. Zónder worden trillingen meer onder- of overschat dan mét aniPFM. "Ik denk dus dat met gebruik van aniPFM een betere simulatie mogelijk moet zijn."

De internationale belangstelling voor voorspellende modellen is groot. "Op dit moment werken we samen met een Duitse partner in een onderzoeksvoorstel waarin 18 partners participeren." Zestien Europese en twee Amerikaanse. "Het einde van de ontwikkeling is dus nog niet in zicht," aldus Kevin Zwijsen.

Hoe kan kernenergie bijdragen aan de energietransitie?

NRG en TNO onderzoeken samen de mogelijke scenario's waarin kernenergie gaat helpen om het klimaatdoel in 2050 te halen: een volledig CO₂-vrije energiehuishouding. "Dat betekent dat we kijken naar bewezen nucleaire technologie die op tijd gerealiseerd kan worden." NRG en TNO werken nauw samen.

Gilliam van Oudenaren en Jelle Oving zijn twee NRG-natuurkundigen (twintigers) die overtuigd zijn van de noodzaak om kernenergie te gaan inzetten. Van Oudenaren: "We hebben in Nederland niet de luxe om bepaalde technologieën uit te sluiten." Oving: "Mijn inschatting is dat in het licht van de klimaatverandering de voordelen van kernenergie ruimschoots opwegen tegen de nadelen." Waarop Van Oudenaren filosofisch toevoegt: "Het beste moment om een boom te planten is twintig jaar geleden. Het op één na beste moment is vandaag."

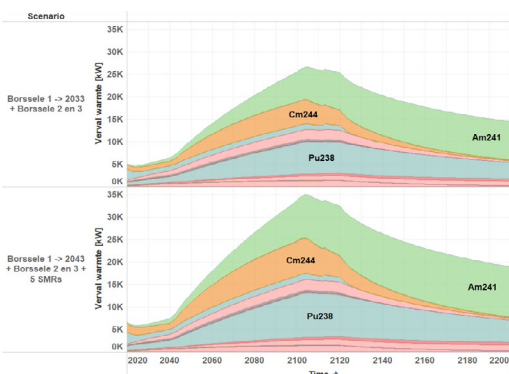
Van Oudenaren en Oving werken samen aan een systeemstudie waarin zij verschillende scenario's met kernenergie in de toekomstige energiemix tegen elkaar afzetten. Meestal wordt dit uitgevoerd door een team van experts met verschillende expertisegebieden. "Vandaar dat we

met TNO samenwerken. Wij kijken voornamelijk naar de nucleaire aspecten, TNO naar de economische factoren."

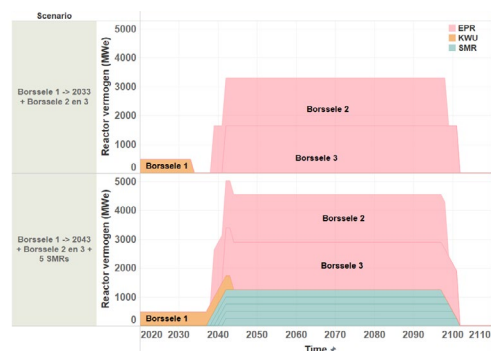
De eerste stappen richting deze systeemstudie werden in de tweede helft van 2022 gezet. De bedoeling is dat de studie in 2023 afgerond wordt. De maatschappelijke belangstelling voor de resultaten is groot. "De industrie en de samenleving vragen om kernenergie en de politiek lijkt klaar voor het maken van keuzes," constateert Van Oudenaren. "Dat kernenergie kan bijdragen, daar is men het wel over eens," vult Oving aan. "Nu is de vraag welke soort reactoren en hoeveel." Worden het twee grote kerncentrales op één plek? Meerdere kleintjes door het hele land? Een combinatie?

De systeemstudie moet inzicht verschaffen.

Verval warmte Warmte productie per isotoop, per scenario.



Reactorpark Evolutie van het opgesteld vermogen voor de twee beschouwde scenario's.





De eerste stap in een systeemstudie is de definitiefase: de beschrijving van het systeem met zijn componenten, hun interacties en het doel. Dus: Wat is de lay out van de infrastructuur in Nederland, welke soorten en hoeveel kerncentrales zijn hierbinnen mogelijk, hoe kunnen die bijdragen aan het doel in 2050 en wat zijn de gevolgen van de keuzes die je maakt.

Puur praktisch komt dit dus uit op de verschillende scenario's die in Nederland vóór 2050 mogelijk zijn met twee nieuwe grote kerncentrales en/of enkele SMRs. Een voorbeeld: "Wat wordt per scenario de behoefte aan verrijkt uranium? En wat wordt de hoeveelheid en samenstelling van het van het geproduceerd radioactief afval." Een indicatie van de uitkomsten staat in de figuur. Komend jaar wordt dit beeld verder uitgedetailleerd.

Oving: "Het mooie is dat wij straks zowel 'hoogover' als zeer gedetailleerde uitspraken kunnen doen. We kunnen iets zeggen over de realiseerbaarheid van nieuwbouw, maar ook over wat er aan radioactief afval overblijft qua stralingsniveaus over pak-hem-beet duizend jaar." NRG en TNO gaan nu samen alle realistische scenario's doorrekenen. "Omdat we een deadline hebben in 2050, kaderen we onze scenario's daarop af. Dus geen thorium/gesmolten zout reactoren." Als gesmolten zout reactoren er gaan komen, zullen ze niet voor 2050 op grote schaal bijdragen. "Wij kijken vooralsnog alleen naar lichtwaterreactoren die werken op verrijkt uranium." Bewezen technologie. "Grote kerncentrales

Gilliam van Oudenaren en Jelle Oving:

“ Wat wordt het economische optimum? ”

kun je gewoon bestellen, SMRs zijn in principe verkleinde uitvoeringen met dezelfde technologie. Ze zullen nu snel op de markt komen.”

Dat kernenergie een betekenisvolle rol kan vervullen bij de toekomstige energievoorziening in Nederland lijkt inmiddels wel duidelijk. Wat nu het optimale scenario is, vraagt echter meer onderzoek en hangt onder andere af van de ontwikkeling van de energievraag van bijvoorbeeld de industrie. Nucleair technisch is het vooral veel rekenwerk waarvoor NRG een dedicated rekenprogramma heeft aangeschaft. "Daar gaan we alle variabelen instoppen." Beschikbare soorten en formaten kerncentrales. Wanneer gaan ze bijdragen? Is dat 2030? 2035 of 2040?" Bouw- en levertijden, dus. Dat leidt tot interessante vervolgvragen waarop het rekenprogramma ook een antwoord geeft. Welke behoefte aan verrijkt uranium hebben de verschillende configuraties? Is er voldoende uranium en verrijkingscapaciteit beschikbaar? En hoeveel afval brengt een bepaald scenario voort en wat moet COVRA doen om dit te kunnen bergen?

"Hier kan TNO vervolgens een prijskaartje aan hangen." De natuurkundigen zijn zelf heel nieuwsgierig naar de economische component waar TNO verantwoordelijk voor is: "Wat wordt het economische optimum?"

De 'vergeten groente' van de nucleaire industrie

Grote belangstelling voor Small Modular Reactors

Begin 2023 publiceerde NRG haar White Paper over kleine modulaire kernreactoren. In het Engels: Small Modular Reactors, oftewel SMR's. Ze zijn nog niet commercieel in gebruik, maar kunnen in de komende 10 jaar beschikbaar komen. NRG zette alle belangrijke aspecten en de huidige stand van de techniek op een rij.

“De belangstelling is nieuw en toch beschrijven we hier ook reactorconcepten die we eigenlijk al decennialang kennen”.

Paul Breijder studeerde Nuclear Energy Engineering in Stockholm en is nu SMR-specialist bij NRG. Het begrip modulair legt hij op twee manieren uit. “Modulair als in ‘modules’, bouwstenen die je in serie in een fabriek maakt en op een locatie samenvoegt. Of modulair als in ‘uitbreidbaar’: je zet één kleine kerncentrale neer en afhankelijk van de energiebehoefte breid je het aantal eenheden uit.” Hoe je het begrip ook uitlegt, het zijn allebei grote voordelen van de SMR.

De relatief nieuwe belangstelling voor de SMR is volgens Breijder onderdeel van de algemene hernieuwde aandacht voor kernenergie. “We willen energie die het klimaat niet belast, grotere energie-onafhankelijkheid – denk aan

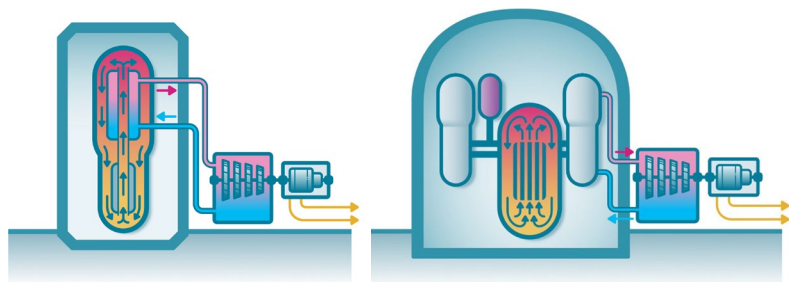
het Russische gas – én we willen grote veiligheid en betaalbaarheid.” Kleine modulaire kerncentrales scoren op al deze aspecten bijzonder goed. Breijder: “SMR's zijn bovendien op de plek van behoefte flexibel inzetbaar voor de productie van elektriciteit, proceswarmte voor bijvoorbeeld de productie van waterstof of voor bijvoorbeeld stadsverwarming.”

Het ei van Columbus. Waarom hebben we daar niet eerder aan gedacht?

“Het leuke is dat we SMR's eigenlijk al heel lang kennen. Onze eigen Dodewaard kerncentrale was al een soort SMR, ook al kenden we dat begrip toen nog niet.” Deze ~55 MW demonstratiereactor uit de jaren 1960 stond gewoon in een uiterwaard langs de Waal. “Een eenvoudig ontwerp met veel passieve veiligheden zoals koeling met natuurlijke circulatie. Hij functioneerde bijna dertig jaar lang zonder problemen.”

Schematische weergave iPWR

Integrated PWR SMR (links) ten opzichte van een PWR (rechts), waarbij alle relevante systemen (bijv. pompen, stoomgeneratoren, drukhouder) zoveel mogelijk binnen het reactorvat gelokaliseerd worden.





Ook in de jaren 1980 werkte Nederland in internationaal verband aan een kleine geavanceerde kerncentrale: de Hoge Temperatuur Reactor (HTR). Een kleine zeer veilige kernreactor waar nu vanuit SMR-perspectief weer veel belangstelling voor is.

Eigenlijk is de SMR dus de ‘vergeten groente’ van de nucleaire industrie. Helaas werd deze industrie na het kernongeval in Tsjernobyl (1986) in de pauzestand gezet en daarmee verdween ook de kleine kernreactor van de radar. Maar naarmate het klimaatprobleem aan urgentie won, nam de belangstelling weer toe. Het grote kernongeval in Fukushima (2011) leidde in de meeste landen niet tot een nieuwe druk op de pauzeknop, maar wel tot een grotere focus op veiligheid. “En juist daar scoort de SMR hoog.”

Een SMR heeft een kleiner vermogen dan een grote kerncentrale. Dat maakt hem per definitie veiliger en ook makkelijker inpasbaar in de energiehuishouding. “En ze hebben veelal ingebouwde passieve veiligheid en enkele ontwerpen gebruiken geavanceerde, veilige brandstoffen. Ze zijn ook vaak simpeler in ontwerp, met minder leidingwerk en andere componenten die stuk kunnen gaan.”

SMR's zijn in absolute zin goedkoper dan hun grote broers. “Door standaardisatie, serie-productie en een korte bouwtijd kun je er eerder geld mee verdienen.” Kortom zowel de maatschappelijke, technische als financieel-economische risico's zijn kleiner.

Paul Breijder:

“ Ik verwacht dat binnen tien jaar de eerste SMR's al zullen draaien. ”

Inmiddels is er sprake van een vlucht naar voren. De Fransen zijn bezig met het NuWard-ontwerp, de Amerikanen met het VOYGR-ontwerp van NuScale (waar bijv. Oost-Europa zeer geïnteresseerd in is) en Estland is bezig met een SMR van GE-Hitachi. “Ik verwacht dat binnen tien jaar de eerste SMR's al zullen draaien.”

Door de grote belangstelling moeten we zelfs opletten dat ze niet aan hun eigen succes ten onder gaan. “We zullen binnen Europa ook aandacht moeten geven aan een eigen maak-industrie.” We willen immers niet afhankelijk worden van makers in China en Rusland. “Om overbelasting van de Franse, Amerikaanse en vertrouwde Aziatische leveranciers te verminderen, zullen we nóg meer eigen industrie moeten interesseren voor participatie.” NRG vindt een belangrijke rol voor de overheid onvermijdelijk. “We moeten zélf de regie krijgen binnen de EU. Dus maak geld vrij en zorg voor enthousiasme bij de industrie om risicodragend te participeren.”

Fire-PSA: verbetermogelijkheden brandpreventie inventariseren en waarderen

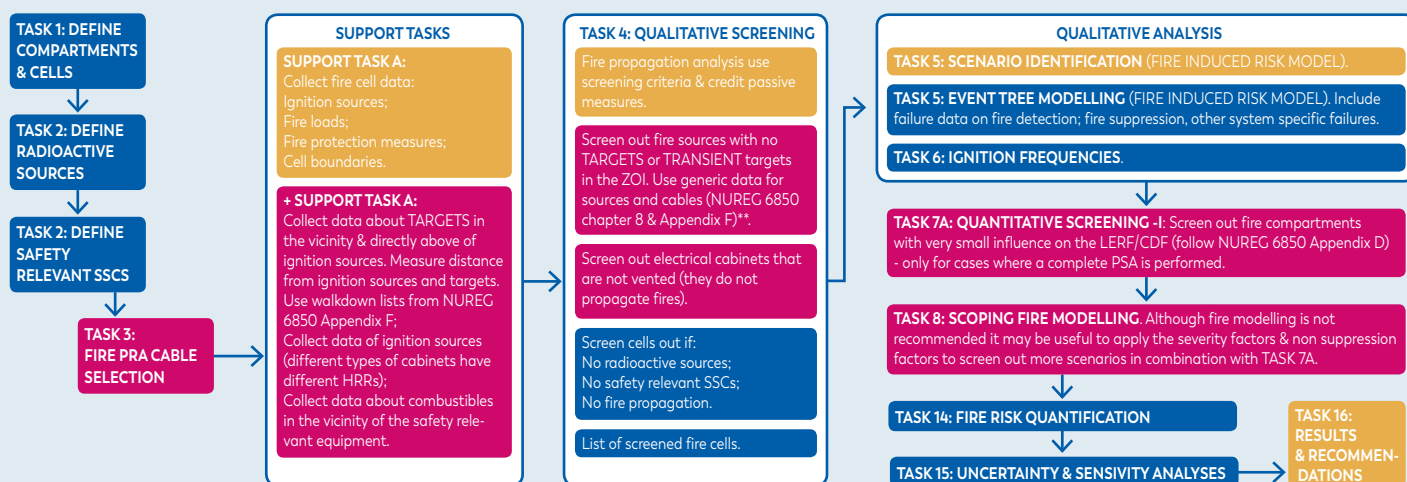
NRG heeft een goede naam voor het uitvoeren van probabilistische veiligheidsanalyses. Die worden gebruikt om te onderzoeken of een installatie met grote risico's (zoals een kerncentrale) aan wet- en regelgeving voldoet. Tegenwoordig wordt de methode steeds meer gebruikt om ook tijdens de exploitatie te onderzoeken of een installatie nóg veiliger kan worden gemaakt. "Daarvoor is wel een aanpassing in de systematiek nodig."

Jacoline Hanekom en Rolf Langius zijn risico-analist bij NRG. "Een Probabilistic Safety Analysis (PSA) gebruik je om de waarschijnlijkheid te bepalen van het optreden van ongewenste gebeurtenissen," legt Rolf Langius uit. "De nucleaire industrie gebruikt de methode om voor de kernenergievergunning risico's te identificeren en te beoordelen." Ook in andere sectoren met grote belangen of risico's wordt de methode gebruikt. Denk bijvoorbeeld aan drinkwatervoorziening of het beheer van cruciale waterwerken zoals stormvloedkeringen.

Afgelopen jaren maakten Hanekom en Langius werk van de zogenaamde Fire-PSA: het realistisch modelleren van brandrisico's binnen het totale risico-model van een installatie.

"De 'gewone' volledige PSA is daarvoor niet geschikt," stelt Hanekom. "Omdat de uitgebreide PSA wordt gebruikt om een vergunning te krijgen en te behouden, zit er altijd veel conservatisme in. Je gaat uit van het slechtste." Immers, veiligheid gaat voor alles, better safe than sorry. "Dat conservatisme is echter niet heel realistisch. Als je de PSA wilt gebruiken om tijdens de bedrijfsvoering mogelijke verbeteringen op te sporen, dan zit dat conservatisme je in de weg."

Een voorbeeld. De 'conservatieve' PSA gaat ervan uit dat een brand in een elektrische ruimte altijd doorslaat naar andere ruimtes. Een meer realistische benadering is dat luchtdichte kasten geen branden zullen verspreiden omdat het vuur door gebrek aan zuurstof vanzelf uitgaat.



KEY: ● also in current method ● from current method, but marked for potential improvement ● from the NUREG 6850 method, suggested to be added to the NRG method

**Consider a study to check what the critical distance is for other typical SSCs e.g. ventilation ducting or consider this as transient combustible.



“Door dit soort uitzonderingen op te nemen in de Fire-PSA, krijg je een veel realistischer resultaat,” aldus Hanekom. “Zo kunnen we met Fire-PSA inzichtelijk maken wat het effect is van individuele verbeteringen.”

Zo maakt Fire-PSA dus duidelijk hoeveel kleiner het brandrisico wordt na een bepaalde preventie-maatregel “en dus ook of de benodigde investering gerechtvaardigd is,” vult Langius aan. “Wat doet een nieuw automatisch blussysteem met het brandrisico? Wat doet het gebruik van brandwerende materialen? Of, om bij het voorbeeld te blijven, wat is het effect van het luchtdicht maken van ruimtes? Dat kunnen we straks zo uitrekenen met Fire-PSA.”

Voor hun realistische benadering deden Hanekom en Langius eerst een uitgebreide, internationale literatuurstudie. “De waarschijnlijkheid van brand in een hoog-risico installatie kun je bepalen aan de hand van historische gegevens, expertkennis en wiskundige modellen.” Daarover is een enorme hoeveelheid informatie beschikbaar. Die maakten Langius en Hanekom eerst behapbaar door selectie op relevantie. “Denk aan de brandbaarheid van materialen, ontstekingsfrequenties, bluskansen en kansen op doorslag naar andere ruimtes. Dat stopten we allemaal in een database.”

Met deze informatie kun je brandrisico's niet alleen kwantificeren, legt Langius uit, maar ook waarderen. “Wat is de kans op een brand op een bepaalde plek, vermenigvuldigd met de gevolgen?



Jacoline Hanekom en Rolf Langius:

“ Door meer uitzonderingen op te nemen krijg je een realistischer beeld. ”

En welke gebeurtenis op welke plek draagt het meest bij aan het risico? Want daar neem je natuurlijk de eerste maatregelen.”

Volgend jaar ligt de nadruk op het beantwoorden van dit soort concrete vragen. Langius en Hanekom zullen dan de door hun vergaarde kennis operationaliseren om de Fire-PSA ook toepasbaar te maken voor gebruik buiten kerncentrales. “Denk aan nucleaire laboratoria of onderzoeksreactoren of zelfs buiten de nucleaire sector.” Er bestaat namelijk geen specifieke methodiek voor buiten kerncentrales. “Wij willen de Fire-PSA dus zoveel mogelijk condenseren tot de kern, en tegelijkertijd een zo realistisch mogelijk resultaat behalen.” Dus zonder ‘overkill’ zoeken naar een optimum, een balans. Als dat klaar is kan NRG voor de nucleaire industrie – en ook voor andere sectoren – concrete brandrisico-analyses gaan doen. “Als er een innovatief karakter aan onze studie zit, dan zit het ‘m hierin.”

Door deze realistische benadering als verbijzondering toe te voegen aan de ‘gewone’ conservatieve PSA-methode, ontstaat een ‘twee-snijdend zwaard’ met uitsluitend voordelen. Conservatief voor de vergunning, realistisch voor verbeterprocessen tijdens de exploitatiefase.

Traineeship bij NRG:

Proeven van nucleaire energie én nucleaire geneeskunde

Sem Leftin is nu process engineer bij de medische startup Fieldlab. Een baan die het resultaat is van zijn traineeship bij NRG. “Wat een ongelooflijke luxe was dat. Ik mocht gewoon tien banen uitproberen en er vervolgens eentje uitkiezen.”

Sem Leftin (27) studeerde scheikunde aan de VU en de UVA, maar had toen hij klaar was ‘nucleair’ nog niet zo op zijn netvlies staan. “Totdat ik een beetje ging rondvragen en een medestudent heel enthousiast vertelde hoeveel chemie er komt kijken bij nucleaire processen.”

Daarna ging het snel. “Ik solliciteerde bij NRG. De moeilijkste vraag die ik kreeg is: waar ligt jouw voorkeur? Bij nucleaire energie of nucleaire geneeskunde? Die kon ik toen niet beantwoorden en nu nog steeds niet.”

Hij mocht het gewoon allebei uitproberen en kwam via de Hoge Flux Reactor en nog wat andere tussenstations uiteindelijk terecht bij de ontwikkeling van nieuwe nucleaire medicijnen. Eén van de interessantste tussenstops vindt Sem het onderzoek naar gesmoltenzout-thorium reactoren. “Ontzettend gaaf om te

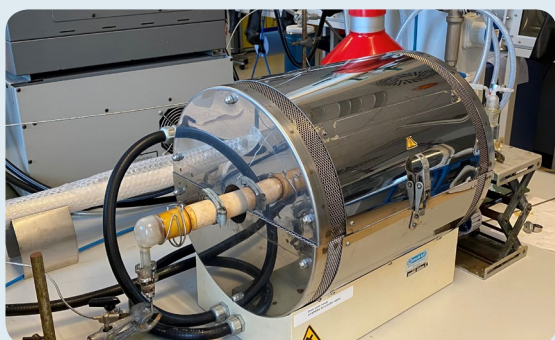
werken aan nieuwe technologie. Niet theoretisch, maar hartstikke praktisch.”

Gesmoltenzout-thorium reactoren worden gezien als de kernenergie van de toekomst. Thorium is overvloedig aanwezig in de aardkorst en het radioactief afval uit een thorium reactor blijft minder lang stralen dan uranium-afval. Het zal echter nog zeker 15-20 jaar duren voor de thorium reactor is uitontwikkeld, en dat is goed nieuws voor de nieuwsgierige technuten van NRG.

“Er moet nog heel veel worden uitgezocht en één daarvan is hoe je moet omgaan met het radioactief afval. Ook al straalt het minder lang, je moet het wel conditioneren en veilig opslaan.” Met het afval uit uraniumreactoren is na ruim een halve eeuw voldoende ervaring. Het hoog-

Testopstelling met een buisoven

Deze werkt net als een gewone oven maar haalt temperaturen van rond de 1200°C. Hiermee kunnen experimenten worden gedaan om het radioactief afval te verwerken in een glas.



Een voorbeeld van verglaasd afval

Een voorbeeld van verglaasd afval na verhitting bij 1100°C gedurende 24 uur.





radioactieve afval wordt verglaasd en kan dan voor de eeuwigheid veilig worden opgeborgen. Dat moet ook gebeuren met thoriumafval. Maar bij thoriumafval moet er eerst een probleempje worden opgelost.

“In tegenstelling tot het uranium-afval zitten er in thorium-afval halogenen. En radioactief afval dat fluor of chloor bevat, mag niet bij COVRA worden opgeslagen.” Fluor en chloor zijn corrosief en tasten het glas aan waarin we het radioactieve afval willen opslaan. “Als dat gebeurt zouden radioactieve elementen uit het glas kunnen ontsnappen. Dat wil je niet, want dan kunnen ze in het milieu terechtkomen.”

Het team waaraan Leftin als trainee was toegevoegd, onderzocht of de halogenen zouden kunnen worden afgescheiden uit het afval. Want dan zou het radioactief afval alsnog in glas kunnen worden geïmmobiliseerd en opgeslagen bij COVRA.

“En dat kan!” Leftin mocht de route voor dit proces uitzoeken en optimaliseren. In het laboratorium werd het afval van een gesmolten-zout-reactor nagebootst en hij kon aan de slag.

“Het blijkt dat als je het afval van een thorium reactor verhit, de halogenen verdwijnen. En als je dan nog verder doorgaat met verhitten in combinatie met glasvormende materialen, dan verglaast het afval tot een stabiele vorm. Die zou COVRA kunnen accepteren voor langdurige opslag.”

Sem Leftin:

“Mijn voorkeur gaat uit naar de proceskant van het vak, maar kiezen tussen nucleaire energie of nucleaire geneeskunde is lastig.”

Kortom: probleem opgelost?

“Nou nee, het onderzoek loopt nog. We lopen tegen de grenzen aan van wat we kunnen meten. Je wil absoluut zeker weten dat er geen halogenen zijn achtergebleven. De analyse-methode die dat honderd procent zeker kan vaststellen, is de volgende trainee nu aan het ontwikkelen.”

Dat gebeurt dus zonder Sem. Die heeft inmiddels een vaste plek gevonden bij FieldLab. “Wel ook weer in de proceskant, trouwens. Ik ben er wel achter dat ik dat leuker vind dan de theoretische kant van mijn vak.” Bij FieldLab wordt gewerkt aan de volgende generatie medische isotopen voor kanker-behandeling: lutetium-177 en lood-212.

Sem Leftin vindt het wel weer leuk om in de voorhoede van een nieuwe technologie aan de slag te zijn. “Maar zoals ik al zei: ik kan slecht kiezen tussen nucleaire energie en nucleaire geneeskunde. Ik sluit dus niet uit dat ik in de toekomst weer een switch maak.”

Reactorvat bestand tegen injectie noodkoelwater?

NRG combineert vloeistof-dynamica met breukmechanica

Stel dat een kerncentrale zijn koelwater verliest. Het is één van de vele scenario's waar een kerncentrale op ontworpen is. Via tal van voorzieningen wordt dan reservekoelwater in de reactor gebracht. Toch is ook de plotselinge injectie van noodkoelwater niet zonder risico. Dit wordt Pressurized Thermal Shock genoemd (PTS). De wand van het reactorvat dient ertegen bestand te zijn.

“Vergelijk het met een bloedheet theeglas dat je plotseling vult met ijskoud water. Het glas kan door deze thermische schok spontaan breken. Daarom zijn kernreactoren zo ontworpen dat ze met dit soort schokken kunnen omgaan. Het gebruikte staal heeft een hoge weerstand tegen thermische belastingen.”

Francesco Brigante is nuclear engineer en consultant en bij NRG. Hij doet onderzoek naar de mogelijkheden om PTS in een reactorvat te modelleren zodat er faalkansvoorspellingen mee kunnen worden gedaan.

“Als PTS optreedt, kan dat leiden tot een plotselinge thermische spanning in het reactorvat. Als

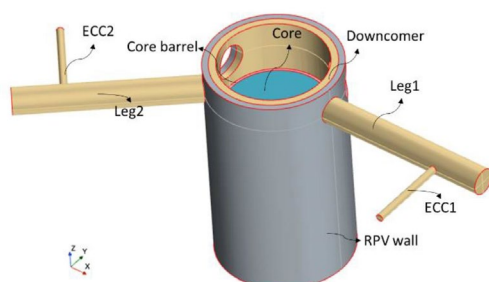
dat tot een scheur leidt, kunnen radioactieve stoffen weglekken. Uiteraard willen we uitsluiten dat dit in een bepaalde situatie gebeurt.”

Wat het bij een reactorvat nóg ingewikkelder maakt, is dat er bij het bepalen van spanning door de injectie van noodkoelwater, ook rekening moet worden gehouden met verouderingsverschijnselen.

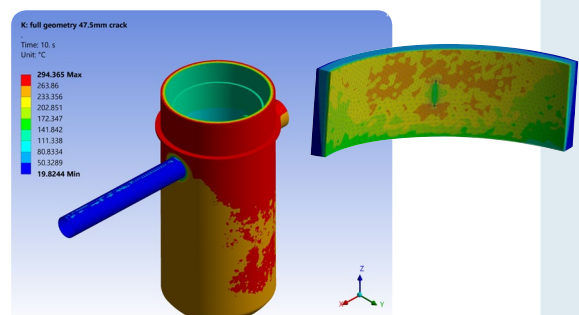
“Zeker als een reactorvat al wat langer in bedrijf is, zal ook de hoeveelheid straling die het staal heeft opgevangen een rol gaan spelen.”

Door de voortdurende blootstelling aan neutronen en gammastraling gaat staal op den duur verbrossen. “Het verliest dan zijn natuurlijke taaheid beetje bij beetje.”

Een schets van het berekening domein voor de betreffende reactor met twee lussen



Thermische belasting (PTS) van de reactorvatwand bij een koelwaterinjectie (segment en complete cilinder)





En omdat er in staal ook altijd kleine onregelmatigheden aanwezig zijn, zou een klein scheurtje in verbrast staal onder invloed van thermische spanningen kunnen uitgroeien tot een lek of een breuk.

Brigante en zijn collega's willen deze fenomenen modelleren zodat er meer inzicht ontstaat in of dit kan gebeuren. Brigante is beslist niet de enige die hier nieuwsgierig naar is. Wereldwijd wordt er veel onderzoek naar gedaan. "Wat ons onderzoek bij NRG uniek maakt, is dat wij breukmechanica combineren met vloeistofdynamica, oftewel Computational Fluid Dynamics (CFD)."

Met CFD-technieken wordt het injecteren van het koelmiddel in het reactorvat gesimuleerd. Breukmechanica richt zich op het gedrag van materialen bij extreme belastingen waardoor breuken kunnen ontstaan. "Door die twee technieken te combineren, kunnen we een analyse maken van het systeemgedrag en thermische belastingen van het reactorvat tijdens de injectie van koelwater."

De resultaten werden gekoppeld aan een eindige elementenmethode-model. Hierin wordt een 'probleemgebied' opgedeeld in een eindig aantal sub-gebiedjes (de elementen). Elk sub-gebiedje wordt beschreven door een set wiskundige vergelijkingen. Hierin ligt de relatie vast tussen de interne krachten, spanningen en vervormingen binnen dit sub-gebiedje. "Je kunt in dit gebiedje dus gaan 'spelen' met

Francesco Brigante:

" Kernreactoren moeten bestand zijn tegen een Pressurized Thermal Shock. "

belastingen zoals rek, spanning en de warmteverdeling om te zien wat er gebeurt," legt Brigante uit. "Door daarna alle sub-gebiedjes met elkaar te verbinden, kan het gedrag voor een groter gebied worden berekend."

Dit klinkt als heel veel werk. "En dat is het ook. Het gaat stap voor stap, net zo lang tot er een representatief beeld ontstaat van de risico-gebieden in de reactor." Uiteindelijk lukte het Brigante en zijn collega's om veronderstelde beginnende scheurtjes te beoordelen in een fictieve reactor met twee koel-kringlopen.

Brigante: "Met de CFD- en eindige elementenanalyses hebben we de meest kritische zones van het reactorvat geïdentificeerd voor het PTS-scenario."

Tot nu toe zijn de modellen complex en zijn de rekentijden erg lang. Het doel is om de berekening te versnellen met een eenvoudiger model om probabilistische analyse te kunnen doen. "Dit zou de vergunningverlener of de toezichthouder in staat stellen te beoordelen of een nieuw of gebruikt reactorvat onder veronderstelde specifieke ongevalsomstandigheden intact blijft," besluit Brigante.

Vat radioactief afval digitaal gekloond:

Real time inzicht én voorspellen van conditie radioactief afval

NRG werkt aan het digitaal 'klonen' van vaten met laag- en midden radioactief afval. Via sensoren op het 'echte' vat, wordt de 'digitale tweeling' gevoed met actuele informatie. "Daardoor heeft de beheerder van het afval altijd real time inzicht in de werkelijke conditie van de verpakking van het radioactief afval. En kan hij voorspellingen doen over de conditie in de toekomst."

Hans Meeussen en Bas Janssen zijn NRG-consultants voor het beheer van radioactief afval. "Dat moet gegarandeerd voor een lange periode buiten het milieu gehouden worden."

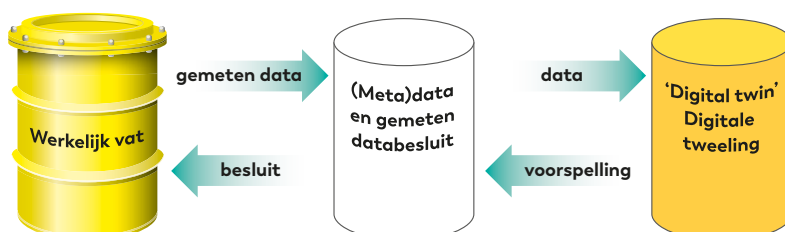
Door ieder afvalvat digitaal te 'klonen', ontstaat er een afspiegeling in de vorm van een computer-model. Janssen: "Van deze betonnen verpakkingen zijn alle begin-parameters bekend, zoals bijvoorbeeld de vochtigheid en dichtheid. Met alle beschikbare gegevens maken we dus een digitale kopie."

Deze tweeling is dus in feite een computermodel van het oorspronkelijke vat met het radioac-

tieve afval. En daarmee kun je in de computer dus allerlei dingen doen. Janssen: "We voeden dit model met data die worden verzameld via sensoren op de 'echte' verpakking." Zo zitten er microfoontjes op die het eventueel scheuren of breken van het beton 'horen'. Ook zitten er dosimeters op die de straling meten, de temperatuur wordt gemeten en ook de vochtigheid. "Veranderingen in de conditie van het beton worden dus altijd opgemerkt."

Janssen: "Met zo'n Digital Twin kan de afvalbeheerder de conditie van de echte verpakking monitoren." Gaat hij scheuren? Verandert de vochtigheid? Verandert het stralingsniveau?

Links: Het 'echte' afvalvat met sensoren.
Midden: Het interactieve platform dat de gegevens en interacties beheert.
Rechts: De Digital Twin die de (toekomstige) integriteit weergeeft op basis van informatie van de sensoren.



Zo worden de vaten met laag- en middenradioactief afval in de praktijk opgeslagen.





Deze kennis per vat is handig voor het beheer van de honderdjarige interim opslag van dit afval in bovengrondse loodsen. “Maar mogelijk ook voor de eindberging van radioactief afval in de diepe bodem. We werken ook aan de informatieoverdracht van de sensoren naar een bovengrondse beheerlocatie.”

De Digital Twin is overigens niet bedoeld voor het hoogradioactieve kernsplijtingsafval “daar bestaan heel andere routes voor.” Dit afval valt dus buiten de scope van het project.

De digitale tweeling is vooral bedoeld voor het segment laag en midden-radioactief afval. “Denk aan afval dat ontstaat tijdens bedrijfsvoering van een kerncentrale, zoals besmet gereedschap of verpakkingsmaterialen,” legt Hans Meeussen uit. “Maar denk ook aan decommissioningsafval dat ontstaat bij de demontage van nucleaire installaties of bij de productie en gebruik van medische isotopen,” vult Janssen aan.

Het laag- en midden radioactief afval wordt verzameld, gesorteerd, geconditioneerd en samengeperst. Daarna wordt het in betonnen verpakkingen opgeslagen bij een afvalbeheerder, bijvoorbeeld COVRA in Nieuwdorp (Zeeland). “Dit soort afval blijft minder lang radioactief dan kernsplijtingsafval, maar moet wel tientallen tot honderden jaren worden opgeslagen voor het is vervallen.” En al die tijd wil je dit afval nauwlettend in de gaten kunnen houden.

Sommige veranderingen zullen onschuldig zijn, andere ernstiger. “Als beton scheurt, dan hoeft



Hans Meeussen en Bas Janssen:

“ Radioactief afval moet gegarandeerd lange tijd buiten het milieu gehouden worden. ”

dat niet erg te zijn. Maar als je daarnaast ook verhoogde straling meet, of hogere vochtigheid, dan weet je dat deze verpakking aan een grondige inspectie toe is.”

Extra interessant is de koppeling van de Digital Twin met de door Hans Meeussen, NRC ontwikkelde ORCHESTRA-tool. “ORCHESTRA voorspelt het lange-termijngedrag van chemicaliën in het beton rond het afval.” Met de gecombineerde kennis van de tool en de sensoren kun je voorspellen welke verpakkingen in de toekomst extra aandacht behoeven. “Je kunt dan vóór een verpakking niet meer voldoet al ingrijpen, bijvoorbeeld door te her-verpakken.”

Naast gericht ingrijpen, kan de Digital Twin juist ook onnodige handelingen voorkómen. “Als een verpakking aantoonbaar nog in goede conditie verkeert, hoef je ‘m natuurlijk niet te vervangen voor een volgende fase zoals transport en eindberging.”

De voorgestelde techniek werkt en komend jaar gaat NRC aan de slag met een dashboard waarop overzichtelijk de conditie van alle individuele verpakkingen wordt gepresenteerd aan de beheerder.

Na 50 jaar pakken we de draad weer op.

Onderzoek naar zout en legeringen Thorium-gesmoltenzoutreactoren

Thorium-gesmoltenzoutreactoren zijn wellicht de kerncentrales van de toekomst. Ze zijn efficiënt, heel veilig en maken maar weinig (probleem)afval. Er moet echter nog veel worden uitgezocht voor ze beschikbaar komen. NRG doet er met de Hoge Flux Reactor veel onderzoek naar. “Ik onderzoek corrosiebestendige metalen en het gedrag van zout in reactoromstandigheden.”

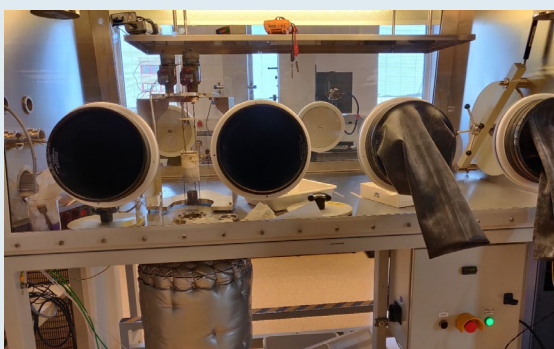
Konstantin Kottrup werkt sinds 2018 als (elektro)-chemicus bij NRG: “Ik houd me bezig met de relatie tussen elektrische stromen en chemische veranderingen. Denk aan elektrolyse – waarin ik gespecialiseerd ben – of in dit specifieke geval: corrosie.” Dit aspect speelt een belangrijke rol in de ontwikkeling van materialen voor thorium-gesmoltenzout kerncentrales.

De van oorsprong Duitse Kottrup heeft chemie gestudeerd in Leiden. Na zijn promotie werd hij daar ‘weggeplukt’ door NRG. “Ik had werkelijk nog nooit van NRG gehoord,” zegt hij lachend. Maar inmiddels zet hij zich bij NRG met hart en ziel in voor de ontwikkeling van de nucleaire bijdrage aan een klimaatneutrale energiehuishouding. “Eén van de grootste uitdagingen van de mensheid.”

Hoewel de belangstelling voor thorium-gesmoltenzoutreactoren vrij nieuw is, stamt het concept al uit de jaren 1950/60. Toen werd in Oak Ridge (USA) daar al mee geëxperimenteerd. “Wij bekijken onder andere de metalen die in die tijd ontwikkeld zijn en die corrosieproblemen tussen het zout en het metaal in de reactor zouden moeten voorkomen.” In feite wordt door NRG dus een ontwikkeling opgepakt die vijftig jaar geleden is afgekap.

De ontwikkelaars van gesmoltenzoutreactoren nu staan voor een dilemma. Want de waarschijnlijk meest geschikte legeringen zijn helaas nooit vergund voor nucleair gebruik. “Voor dat kon gebeuren werd de ontwikkeling al gestaakt.” Het wél vergunde reactorstaal van lichtwaterreactoren is minder geschikt voor gesmolten-

Gemodificeerde glovebox met opstelling voor lab-testen met gesmolten zout



Voorbeeld van zout-monster met daarin uranium voor lab-testen





zoutreactoren. “De industrie moet nu óf de corrosieproblemen van wél vergunde legeringen onder controle krijgen, of keihard werken aan het vergund krijgen van de oorspronkelijk bedoelde legeringen.”

NRG heeft inmiddels het initiatief genomen om legeringen onder reactorcondities te testen op hun interactie met zout. “Daarbij willen we ook de technologie ontwikkelen om on-line en real-time te registreren wat er in het zout in de reactor gebeurt. Dit is in eerste instantie bedoeld als een ‘proof-of-concept’ om te laten zien dat het überhaupt kan.”

Klinkt eenvoudig, maar besef wel dat de elektronica twee jaar lang in de Hoge Flux Reactor moet kunnen overleven. “Het geheel moet dus in één keer goed zijn, je kunt dit soort langdurige experimenten niet onderbreken of eventjes overdoen.”

Om goed te kunnen vergelijken, heeft NRG vijf capsules gemaakt vanuit een aantal legeringen van verschillende fabrikanten. Alle vijf worden bij NRG gevuld met speciaal gefabriceerd zout. “Deze productie leidt op zich al tot leerervaring. Maar echt spannend is om de elektrodes en de bekabeling voor het meetwerk aan te brengen.”

Zo moet een druksensor onder reactor-omstandigheden de afgifte van gassen meten. Platina-elektroden genereren stroom-spanningsgrafieken om het corrosieproces en het gedrag van het zout in de reactor te kunnen volgen.

Konstantin Kottrup:

“ Wij pakken de draad op waar hij vijftig jaar geleden eindigde. ”

Dus: welke splijtingsproducten zitten erin?
In welke verhoudingen? Gasvormig of vast?
Hoe sterk corroderend is het zout?

In de engineeringfase heeft Kottrup al enkele flinke tegenvallers moeten overwinnen waardoor het bestalingsexperiment moest worden uitgesteld. “Ik schat de kans dat de on-line metingen uiteindelijk lukken op fifty/fifty.”

Moet je er dan wel aan beginnen?
“Zelfs als het on-line meten mislukt, is dit experiment alsnog geslaagd.” Want ook achteraf is er veel vast te stellen; metingen aan de capsule-oppervlakken, zouteigenschappen na bestraling, metingen aan splijtingsproducten – allemaal data waar de wereld om zit te springen. “Mooier is natuurlijk om gedrag en processen real time te kunnen volgen zodat je kunt bijsturen. Ook daar leer je weer van.”

Na ruim een jaar van ‘trial & error’ lijken de capsules en de elektronica nu echt reactor-proof te zijn. “Als het goed gaat, kunnen we vanaf 2024 twee jaar lang de capsules en het zout real-time gaan onderzoeken op hun gedrag in de HFR,” aldus Konstantin Kottrup.

Nuclear. For Life.



www.nrg.eu