

16 - De veiligheid van geavanceerde reactoren

- [RB Duffey](#) ¹,
- [D. Hughes](#) ²

Laat meer zien

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100149-3.00016-1>

Get rechten en inhoud

Overzicht

Beschermingsmaatregelen moeten worden genomen om te voorkomen dat het gebruik van technologie van het doen van schade aan de volksgezondheid en het welzijn.

Admiral Hyman G. Rickover, Hoorzittingen voor het Paritair Comité voor Atoomenergie, 91ste Congres, tweede zitting, 19-20 maart 1970, p. 101, Washington, DC, USA

Abstract

De veiligheid van geavanceerde reactoren (ARS) wordt onderzocht volgens de nieuwste inzichten, wijzigingen in de regelgeving, veiligheid doelen en risicobeoordeling suggesties. Deze studie omvat alle soorten, concepten en ideeën AR voorgesteld heden, om de vergelijking en analyse van de veelheid van modellen vergemakkelijken en concepten worden ingedeeld volgens hun koelmedium (water, gas en andere vloeistoffen). De behandeling en het beheer van zeldzame en extreme gebeurtenissen wordt bijzondere aandacht besteed, waaronder de nieuwste Generatie IV (Gen IV) doelen, criteria, en licenties beoordelingen. De veiligheid principes en methodes door diverse instanties (Gen IV International Forum, Western European Nuclear Regulators Association en de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission) voorgesteld worden vermeld. Het doel van licenties en van ontwerper / operator verantwoordelijkheden worden vergeleken, evenals de banden tussen probabilistische en deterministische risicoanalyse technieken en de rol van de rampenbestrijding.

Het hoofddoel veiligheid van Gen IV reactor planten te voorzien van fundamentele warmteverwijdering onder alle omstandigheden. De kritische noodzaak van onbepaalde warmteafvoer om een ultieme koellichaam wordt benadrukt. Bijzondere nadruk wordt gelegd op het vermijden van de kern schade Gezien het grote potentieel voor maatschappelijke ontwrichting en het verlies van de investeringen als gevolg van ongevallen, inclusief de rol van defensie-in-diepte, multiple falende barrière, en de overweldigende menselijke bijdrage aan echte ongelukken. Opmerkingen worden gegeven over het concept van de “praktische eliminatie” van bepaalde ongevallen voor bepaalde AR.

Omdat de meeste AR concepten een beroep doen op een of andere vorm en het type van natuurlijke circulatie warmteafvoer de focus wordt over de methoden en het begrip van de gebruikte analysemethode of geadopteerd. Een kort overzicht van enkele van de literatuur over de stabiliteit van de stromen in kanalen en natuurlijke circulatie loops, in het bijzonder in relatie tot nucleaire reactor-aangedreven

systemen, wordt gepresenteerd. Een stelsel modelvergelijkingen voor gekoppelde natuurlijke circulatielussen samengevat. Lange termijn, betrouwbare, passieve koeling van enkele Gen IV systemen berust op duurzame exploitatie van gekoppelde natuurlijke circulatie loops.

Uit de literatuur blijkt dat op experimentele data van eenvoudige geïdealiseerde stromen en realistischer complexe systemen worden gebruikt om modellen en codes die wordt toegepast op analyse van Gen IV centrales valideren. Experimentele faciliteiten voor het onderzoeken van de lange termijn passieve koeling worden steeds beschikbaar en modellen en codes worden gevalideerd met de gegevens.

trefwoorden

- Geavanceerde reactoren ;
 - Gekoppeld natuurlijke circulatie loops ;
 - Gen IV veiligheid ;
 - Stabiliteit
-

16.1. Uitgangspunten veiligheid

In dit hoofdstuk bespreken we en beschrijven van de veiligheid van nieuwe reactoren, met inbegrip van de stand van de techniek en uitdagingen in de analyse en testen. Zoals zo lang geleden, moeten waarborgen worden geboden tegen de gevaren van nieuwe technologie te doen letsel aan en alle aspecten van de natuurlijke hulpbronnen, vitale diensten, en het gehele menselijke omgeving ([Rickover, 1970](#) , blz. 96).

In dit hoofdstuk wordt de term *geavanceerde reactoren* (ARS) omvat alle die verschillend in het ontwerp of het concept van die welke thans in licentie gegeven en in de handel verkrijgbaar zijn. Voor technologisch innovatief en maatschappelijk wenselijk redenen wordt over het algemeen over eens dat nieuwe reactoren, ongeacht hun generatie design of werkingsprincipes, moet veiliger dan enig moment ingezet worden. Dit is vooral benadrukt door de Fukushima reactor meltdowns, wat onverwacht was en veroorzaakte belangrijke sociale zorg en politieke verstoring in Japan en wereldwijd.

Deze kern kernsmelting is, en is veroorzaakt door, een zeldzame gebeurtenis: een seismisch geïnduceerde tsunami van grote afmetingen die veroorzaakt verlies van bijna alle kracht en controle. Zo lag de initiërende gebeurtenis die buiten de veiligheidsanalyse omhullende van hetgeen was behandeld tijdens de ontwerpfase, dan de “ontwerpbasis” van wat zo'n veiligheidsmarge en systeem constructief ontwerp beschouwd en is ernstiger dan overwogen risicobeoordeling voor natuurrampen.

16.2. Veiligheid en betrouwbaarheid doelen

De top-level veiligheidseisen voor nieuwe reactor concepten zijn verklaard en internationaal door de Generation IV International Forum (GIF) overeengekomen ([Kelly, 2014](#)). Deze eisen zijn in wezen van toepassing op alle AR's en worden gegeven als:

1.

Excel in veiligheid en betrouwbaarheid,

2.

Hebben een zeer lage waarschijnlijkheid en de mate van reactorkern schade, en

3.

Elimineren de noodzaak voor off-site rampenbestrijding.

Hoewel deze doelen zijn prachtig en wenselijk, de veiligheid van een nieuwe systeem is nog steeds onderworpen aan interessante en bekende vragen:

-

Wat zijn de werkelijke gedetailleerde veiligheidseisen?

-

Hoe wordt de veiligheid te analyseren?

-

Welke scenario's of ongevallen moeten worden opgenomen?

-

Wat is een "kleine kans of mate"?

-

Wat zijn de onzekerheden?

-

Hoe wordt de nieuwe technologie een vergunning?

-

Hoe te reageren op ongelukken als er geen antwoord nodig is?

-

Wat wel of niet een aanvaardbaar risico?

Nieuwe concepten voor AR's zijn er in vele verschillende vormen en heten vele verschillende namen naar hun voorstanders en ontwikkelaars. Enkele eenvoudige ontwerpen, zoals de vele vloeibaar metaal gekoelde snelle reactoren, watergekoelde superkritische systemen en heliumgekoelde hogetemperatuurreactoren, dateren zelfs terug 60 of meer jaren. Vele prototypes en planten demonstratie werden beide gebouwd en geëxploiteerd, soms als onderdeel van militaire activiteiten voor nucleaire voortstuwing en wapens materiële productie. Deze overvloed aan acroniemen en benoemen nu ook het GIF-systemen, kleine, middelgrote en / of modulaire reactoren (RBE), en vele soorten en varianten van AR. De historische nomenclatuur is tot stand gekomen grotendeels voor programmatische, financiering, en commerciële ontwikkeling redenen, met een verschillende mate en claims voor een betere, passief, verbeterd, inherent en / of super veiligheid. Gelukkig, vanuit een zuiver nucleaire veiligheid perspectief, de problemen zijn volledig generieke en afhankelijk van de totstandbrenging van de kans op

-

Ongecontroleerde gebeurtenissen die de Design Challenge,

-

Uitgebreide economische en / of maatschappelijke schade en / of

-

Potentiële of eigenlijke release van radionucliden.

De basis overkoepelende en belangrijkste Safety doelstelling (SO) is de reactorkern gekoeld en onder voortdurende houden ([ASME, 2012](#) , blz. 32, [Howlett, 1995](#) ., Blz 5) en, zo niet, kunnen beperken en / of de gevolgen te beheren zonder dat dit onnodige of onaanvaardbare risico's voor het publiek. Immers, wanneer de reactor niet wordt gecontroleerd en gekoeld, vervolgens de kern kan smelten en / of afgifte radioactiviteit, hetgeen ongewenst fysiek en financieel kapot de plant en de investering. De overvloed van subsidiaire doelen, regels, criteria, evaluaties, voorschriften en analyses zijn alle gericht op het aantonen of ondersteunende verwezenlijking van deze fundamentele SO door een combinatie van design, back-up systemen en noodmaatregelen en procedures combinatie zijn van een veiligheidszone, risico en structuuranalyse.

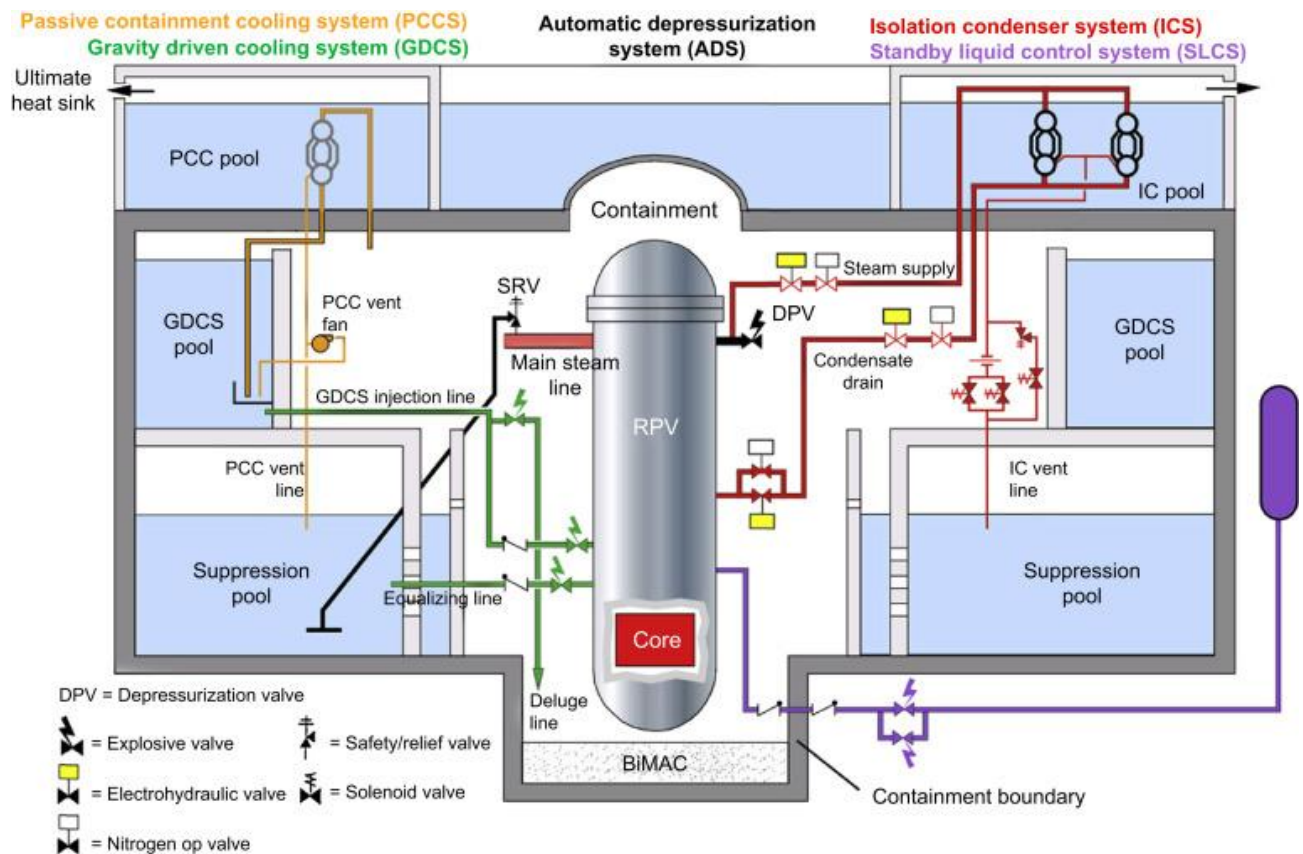
Licensing procedures en processen voor het publiek risico's vast te stellen ook variëren per land en jurisdictie, maar ze zijn gewoon een formeel middel om de mate van geloof en rechtvaardiging vast te stellen voor de kans om, met behulp van de veiligheid analyserapporten, de methoden, evaluaties, reviews, of claims. De mate van detail en de exacte aanpak door de regelgevende autoriteiten vastgestelde of verwachte lopen sterk uiteen, en vandaag zijn ze vaak specifiek voor het land en de grond.

16.2.1. Dochteronderneming veiligheidseisen en licenties beoordeling

Het filiaal veiligheidseisen die voortvloeien uit deze fundamentele doelstelling zijn verspreid zoals wettelijk afdwingbaar veiligheid en design criteria. Bijvoorbeeld, wordt de vergunningsprocedure voor nieuwe reactoren in de Verenigde Staten geregeld in de Code of Federal Regulations ([US NRC, 2004](#)). Deze regels voorzien in een procedure voor het opstellen van een standaard of “gecertificeerd” design basis en vereisen een “veiligheidsanalyse rapport (dat) beschrijft uiteindelijke ontwerp van de installatie, evaluatie van de veiligheid, operationele grenzen, de verwachte reactie van de plant om vooropgestelde ongevallen, en de plannen voor het omgaan noodsituaties”, dat wordt gebruikt voor de doeleinden van formele veiligheidsanalyse en beoordeling.

In een dergelijk model en licenties beoordeling gevallen alle beschikbare middelen en mogelijk als bron van water en koeling worden ingeroepen voor de koeling, met inbegrip van veiligheid, nonsafety, back-up, en noodsystemen. Gebeurtenissen die “buiten” zijn of daag het ontwerp basis, of waren eerder het label “ongelooflijk” of “hypothetische” heten nu “ernstige ongevallen” of “uitgebreide voorwaarden.” Het ontwerp en de werking kan ook onderworpen aan “stresstests zijn, ”aanvullende maatregelen, gelaagde veiligheidssystemen, en uitgebreide noodmaatregelen.

De meest relevante, actuele en publiekelijk beschikbaar geheel van aanvullende veiligheidseisen voor de beoordeling van een AR zijn die gebruikt worden voor de recente herziening van de economische vereenvoudigde kokend water reactor (ESBWR), de grootste passief gekoeld reactor dat de volledige licentie-proces heeft ondergaan. De ESBWR is dan 1200 MW_{el} en gebruikt natuurlijke circulatie van koelwater (zie [figuur 16.1.](#)).



Figuur 16.1.

Schematische economische vereenvoudigde kokend water reactor met verschillende koelsystemen ([Saha et al., 2013](#)). DPV , Depressurization Valve; IC , Isolation condensor; SRV , veiligheidsklep; PCC , Passieve Containment Cooling; RPV , reactorvat; BIMAC , Basemat interne Melt arrestatie en koelbaarheid (Device)

Figuur opties

De Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (NRC) Safety Evaluation Report ([US NRC, 2014](#)) geeft de criteria voor de risicobeoordeling op basis van de kern schade frequentie en de termijnen voor het gebruik van de veiligheid en nonsafety systemen, zoals afgeleid uit een full-scope Probabilistic Risk assessment (PRA) analyse ([Bhatt en Wachowiak 2006](#)). Deze NRC aanpak stelt de veiligheidsrichtlijnen als volgt:

Ten eerste, de gerichte PRA handhaaft dezelfde omvang van initiërende gebeurtenissen en hun frequenties als die die in de basislijn ESBWR PRA. Hierdoor non veiligheidsrelevante structuren, systemen en componenten (SSC's) gebruikt om het optreden van initiërende gebeurtenissen zullen worden onderworpen aan regelgevingstoezicht overeenstemming met hun betrouwbaarheid / beschikbaarheid (R / A) opdrachten voorkomen.

Ten tweede, na een initiërende gebeurtenis, het evenement boom logica van het uitgebreide, Niveau drie gericht PRA zal niet de effecten van niet-veiligheidsgerelateerde standby SSC's. Hierdoor kan de Combined Operating License (COL) aanvrager om te bepalen of de passieve veiligheidssystemen, wanneer uitgedaagd, kan voldoende mogelijkheid te bieden (zonder niet-veiligheidsrelevante back-up) om het NRC doel veiligheidsrichtlijnen voor een cumulatieve schade Function (ontmoeten CDF) van minder dan 1×10^{-4} per jaar reactor en een grote release Frequency (LRF) van minder dan 1×10^{-6} per reactor jaar.

Het ontwerp certificering aanvrager zal ook de evaluatie van de containment prestaties, met inbegrip van bypass, tijdens een ernstig ongeval (SA). Als het ontwerp certificering aanvrager bepaalt dat-nonsafety gerelateerde SSC's moet worden toegevoegd aan de gerichte PRA model om de veiligheid doelen te bereiken, dan zijn deze SSC's zullen worden onderworpen aan regelgevend toezicht op basis van hun risico betekenis.

Bovendien, want er is een criterium dat "SSC-functies (zijn) ingeroepen om de veiligheid op lange termijn (na 72 uur) te garanderen en seismische gebeurtenissen Aan te pakken," en het is ook vereist dat

... .het ontwerp certificering aanvrager PRA inzichten, gevoeligheid studies, en deterministische methoden te gebruiken om het vermogen van het ontwerp aan kernkoeling en containment integriteit te behouden dan 72 uur vast te stellen. Niet-veiligheidsrelevante SSC's die nodig zijn om deterministische wettelijke voorschriften te voldoen, het oplossen van de veiligheid op lange termijn en seismische kwesties, en het voorkomen van belangrijke nadelige systemen interacties zijn onderhevig aan regelgevend toezicht.

Het personeel verwacht dat de regelgevende controle op alle niet-veiligheidsrelevante SSC's die nodig zijn om NRC vereisten, richtsnoeren doel de veiligheid en insluiting prestaties doelen te bereiken, zoals geïdentificeerd in de gerichte ESBWR PRA model.

De eisen voor de PRA worden vervolgens vermeld als

Dit PRA bevat alle nodige interne en externe evenementen voor zowel stroom als het buiten gebruik stellen. Het proces omvat ook een adequate behandeling van Risk Assessment onzekerheden op lange termijn werking veiligheid en insluiting prestaties. Een marges aanpak wordt gebruikt om seismische gebeurtenissen te evalueren. Bij het aanpakken van containment prestaties, de PRA beschouwt de gevoeligheden en onzekerheden in ongevallen zich ontwikkelen, evenals de opname van ernstige ongevallen verschijnselen, met inbegrip van de expliciete behandeling van containment bypass. De PRA maakt gebruik van gemiddelde waarden van de beschikbare passieve systemen en de frequenties van kernschade en grote releases bepalen. De werkwijze schat de omvang van potentiële variaties in deze parameters en geeft belangrijke bijdrage aan deze variaties met behulp van geschikte onzekerheid en gevoeligheidsanalyses.

Vergelijkbare gekwantificeerde doelen bestaan in andere landen voor nieuwbouw, en sommige zijn afgekondigd als nominaal "technologieneutraal" (dat wil zeggen, de eisen zijn niet afhankelijk van het type reactor). De veiligheid inzending moet blijven dat de voorgestelde ontwerp wordt voldaan aan bepaalde algemene gekwantificeerde criteria ([CNSC 2008](#)):

Core Damage Frequency (CDF)

De som van de frequenties van alle event sequenties die kunnen leiden tot aanzienlijke kernaantasting minder dan 10^{-5} per reactor jaar.

Kleine release Frequentie (SRF)

De som van de frequenties van alle event-sequenties die kunnen leiden tot een lozing in het milieu van meer dan 10^{15} becquerel jodium-131 is minder dan 10^{-5} per reactor jaar. Een grotere versie kan tijdelijke evacuatie van de lokale bevolking nodig.

Grote release Frequency (LRF)

De som van de frequenties van alle event-sequenties die kunnen leiden tot een lozing in het milieu van meer dan 10^{14} Bq cesium-137 is minder dan 10^{-6} per reactor jaar. Een grotere persbericht kan op lange termijn verplaatsing van de lokale bevolking nodig.

Hoewel dit een eenvoudige en aantrekkelijkheid zijn er twee eenvoudige problemen met dit soort werkwijze als volgt:

Ten eerste, de oorspronkelijke focus van de formele safety case beoordelingen gebruikt voor alle bestaande ontwerpen was op het analyseren van het ontwerp-basis transiënten en ongevallen, en het uitvoeren van geformaliseerde PRA's die externe gebeurtenissen omvatten, met als doel het aantonen van een lage waarschijnlijkheid en het beheer van de risico's van de kern schade. De reactor ongevallen op Fukushima Daiichi aangetoond dat de vorige veiligheidsanalyses en schattingen waren onvolledig, te optimistisch, en niet voldoende onder extreme gebeurtenissen, of zelfs te pakken de sociale gevolgen en de reactie van het publiek om dergelijke ongevallen, zelfs wanneer weinig straling vrijkomt en er geen dodelijke slachtoffers zijn direct toerekenbare ([ASME 2012](#) , [Suzuki, 2014](#)).

Ten tweede, als feitelijke gebeurtenissen tot nu toe hebben aangetoond, de nominale vereiste 72-h, of iets dergelijks soortgelijke interval deels gebaseerd op subjectieve beoordeling van de tijdschalen beschikbaar voor potentiële noodsituaties en herstel acties en de levensvatbaarheid en de haalbaarheid van het verstrekken van back-up power en koeling zal waarschijnlijk te kort en enigszins arbitrair. Zelfs als noodmaatregelen worden “gecrediteerd” na deze tijd, of vereisen de inzet van gekwalificeerde apparatuur, is er nog steeds een belangrijke en eindige waarschijnlijkheid niet volledig herstel nodig energie voor koeling ([Duffey en Ha, 2013](#)).

16.2.2. De veiligheid focus voor geavanceerde concepten

Huidige gegevens reactorongevallen illustreren dat de werkelijke CDF hoger dan voorspeld, vooral vanwege de ontoereikende preventie en bestrijding van extreme en onverwachte gebeurtenissen. Vandaar dat de focus voor AR concepten is verplaatst van ontwerp-basis ongevallen (DBA) te onderzoeken SA, welke kern schade omvatten; buitenontwerpongevallen-basis ongevallen (BDBAs), die een betrouwbare “werkomhulling” en veiligheidssystemen en barrières uitdaging; en zeldzame of extreme gebeurtenissen (REE), die meerdere systemen onbruikbaar en vereisen kernkoeling en / of noodmaatregelen over langere tijdschalen.

Vandaar dat de moderne veiligheidsanalyse hiërarchie als volgt voor de verschillende klassen en continuüm van mogelijke gebeurtenissen naar voren gekomen:

DBA's : Een formele definitie van wat de verwachte structurele, seismische, ongeval, en van voorbijgaande aard belastingen en systemen die moeten worden “ontworpen in” het systeem. Aantonen defensie-in-diepte (deed) en de operationele controle door formele aandacht voor de structurele integriteit, technisch ontwerp, de veiligheid werking van het systeem, kernfysica en fysieke barrière-eigenschappen, en de goedkeuring van de relevante codes, best practices en technische normen.

BDBAs en CTF : een “uitbreiding” van de gebeurtenissen die formeel worden beschouwd veiligheidsanalyse dat het ontwerp ver buiten zijn normale of beperken gebruiksgebied draait en degradatie van systemen, componenten en structuren

bevat. Analyseren en aan te pakken zwakheden en risico-dominante ongevallen op de hoogte met behulp van probabilistische veiligheidsanalyses en noodmaatregelen en procedures om de veiligheidsprestaties met behulp van state-of-the-art computer codes en dienstige gegevens te beheren.

REE's : A "stresstest" van wat uitersten zou kunnen die uitdaging evolueren de integriteit, koelbaarheid, bruikbaarheid en beheersbaarheid van de reactor, met inbegrip gevolg mitigatie en sociale gevolgen. Ontwikkelen van rampenbestrijding en apparatuur maatregelen voor het reageren op en het beheren van en het omgaan met grote uitdagingen en schade aan complete systemen, om de impact en de gevolgen voor de gezondheid van radioactieve releases een minimum te beperken en te voorkomen of maatschappelijke ontwrichting te verminderen, en de ondersteuning van strategische besluitvorming.

All Risk : Zorg voor een onafhankelijk onderzoek en technische evaluatie van alle aspecten van de analyse, het ontwerp, de bouw, de exploitatie, licenties, onderhoud en beheer die van invloed zijn proces veiligheid en uitdaging en vereisen verificatie van alle vorderingen, besluiten en verordeningen.

Deze hiërarchie van ernst komt en sluit nauw aan bij de formulering van het "All Risk" filosofie veiligheid reactor "voorkomen dat grote radioactieve releases die ernstige verstoring van de maatschappij kunnen veroorzaken" ([ASME, 2012](#) , blz. 53) en is het met de originele en fundamentele rickover Waarborgen Model.

16.2.3. Emerging en nieuwe veiligheids ontwerpcriteria

Om aan deze behoeften en hiërarchie voor de ondersteuning van AR ontwerp en conceptontwikkeling, een opsomming van een aantal 83 veiligheid ontwerpcriteria (SDC) zijn al ontwikkeld door de GIF te formaliseren. Hier is geëvolueerd van uit specifieke afgeleid voor natriumgekoelde snelle reactor (SFR), maar is algemeen toepasbaar voor AR.

Deze SDC's zijn uitgebreid. De volledige lijst en uitleg zijn niet openbaar worden gemaakt, maar de omvang en het belang kan worden gezien van de in een reeks internationale workshops georganiseerd door de International Atomic Energy Agency (IAEA) informatie en worden getoond in de volgende lijst. (Let op: Enkele van de belangrijkste daarvan zijn gemarkeerd in cursief voor latere referentie, en de op dat moment publiekelijk beschikbaar criteria worden als opzettelijk weggelaten ongenummerde hiaten.)

Veiligheid Ontwerp Criteria: gedeeltelijke lijst met bewerkte NRC revisieopmerkingen .

([Sofu 2014](#) , [Nakai, 2013](#) ; informatie met dank aan de IAEA, Wenen)

•

Criterium 1. De verantwoordelijkheden voor het beheer van de plant design: De aanvrager wordt er verantwoordelijk voor dat het ontwerp voldoet aan alle geldende veiligheidseisen.

•

Criterium 2. Management systeem voor de plant design: Kwaliteitsborging (QA) eisen moeten verder gaan dan "ontwerp" overwegingen aan de opleiding van personeel aan te pakken, onder andere een correctieve actie programma, en het adres van een inspectie en test besturingsprogramma.

•

Criterium 3. Veiligheid van de plant design gedurende de levensduur van de plant: Aanvrager dient QA verantwoordelijkheid voor de taken die aan externe organisaties zijn toegewezen voor het ontwerp van specifieke onderdelen te behouden.

•

Criterium 4. Fundamentele veiligheidsfuncties: Onderwerp van “giftige chemische stoffen” moet worden gekoppeld aan de nucleaire veiligheid (en) koelvloeistof voorraadbeheer moet een veiligheidsfunctie zijn.

•

Criterium 5. Stralingsbescherming: Gebruik van As laag als redelijkerwijs haalbaar (ALARA) principe en aanvaardbare grenzen dosis voor operationele toestanden en omstandigheden ongeval.

•

Criterium 6. Ontwerp voor een kerncentrale: Moet verontreiniging van de faciliteit te minimaliseren. Vertrouwen op passieve systemen of inherent functies om fundamentele veiligheidsfuncties uitvoeren, moet worden benadrukt. Design-basis bedreigingen (DBT's) moeten worden opgenomen in de scope.

•

7. Toepassing van criterium deed: Definitie van gebeurtenissen buiten de vastgestelde veiligheidsomhulsel moet bevatten DBT's. DiD (per IAEA-definitie) is een belangrijk onderdeel van de veiligheid van de filosofie, maar niet een wettelijke vereiste in de Verenigde Staten.

•

Criterium 8. Interfaces van veiligheid met beveiliging en waarborgen.

•

Criterion 9. Bewezen technische praktijk: Scope aan het adres van materialen selectie, fabricage, installatie, onderzoek en testen.

•

10. criterium veiligheidsbeoordeling: vastleggen gebeurtenissen buiten de vastgestelde veiligheidsomhulsel moet omvatten DBT (en) een QA voorziening voor veiligheidsbeoordeling en uitgebreid tot operationele fase (niet alleen het ontwerp fase) om de wijzigingen in het ontwerp te dekken omvatten.

•

Criterium 11. Voorziening voor de bouw: “Design” definitie industrie, de bouw, montage en installatie omvatten.

•

Criterium 12. Features afvalbeheer en ontmanteling te vergemakkelijken: Rad-afvalminimalisering bepaling moet worden opgenomen.

•

Criterion 14. Ontwerp basis voor items van belang voor de veiligheid: Definitie van gebeurtenissen buiten de gevestigde veiligheid enveloppe moet omvatten DBT's.

•

•

Criterium 16. Veronderstelde initiërende gebeurtenissen: De afhankelijkheid van manuele start van de systemen in plaats van automatische actie om de respons op een initiërende gebeurtenis beperken mag slechts in een beperkt aantal gevallen (bijvoorbeeld brandveiligheid) en definitie van gebeurtenissen buiten de vastgestelde veiligheidsomhulsel moet omvatten DBT's.

•

Criterium 19. DBA's: geen begeleiding in de Verenigde Staten over de evaluatie van DBA's met behulp van best estimate methoden, met inbegrip onzekerheid; nieuwe criteria nodig zijn om het ontwerp-basis natrium ongevallen SFRS af te bakenen.

•

Criterion 20. Ontwerp extensie voorwaarden: beperkte reeks gebeurtenissen ernstiger dan DBA's [station black-out, de verwachte transiënten zonder scram (ATWS), invloed vliegtuigen, etc.] voor "design extensie" eisen. *Het ontwerp moet zodanig zijn dat het ontwerp-extensie die zouden kunnen leiden tot een aanzienlijke radioactieve releases praktisch worden geëlimineerd.*

•

Criterium 21. Fysieke scheiding en onafhankelijkheid van veiligheidssystemen: scheiding en onafhankelijkheid van toepassing in het verschaffen deed voor het ontwerp van een fysieke beschermingssysteem.

•

Criterium 23. Betrouwbaarheid van de items van belang voor de veiligheid: Voeg het ontwerp van een fysieke beschermingssysteem.

•

Criterion 25. Een individuele fout criterium: Ontwerp van een fysieke beveiligingssysteem moet een storing die de beveiligingsfunctie ineffectief of niet beschikbaar zal maken te voorkomen.

•

Criterion 29. kalibratie, testen, onderhoud, reparatie, vervanging, inspectie en controle van de items van belang voor de veiligheid: Inclusief fysieke beveiligingssysteem; arbeider blootstelling moet ALARA (niet alleen onder bepaalde grenzen).

•

Criterion 31. Veroudering beheer: Er moet worden voorzien voor het verstrekken van voldoende ruimte in de faciliteit om verwijdering en reparatie / vervanging van verouderingsmechanismen / componenten te vergemakkelijken.

•

Criterium 32. Ontwerp voor een optimale operator prestaties: Voeg ontwerp van een fysieke beschermingssysteem; kwalificatie van personeel en overwegingen van essentieel belang om ervoor te zorgen dat de exploitanten van de functies in verband met veilige installatie controle (training en menselijke prestaties trending) kan uitvoeren moet worden aangepakt.

•

Criterium 33. Het delen van beveiligingssysteem tussen meerdere eenheden van een kerncentrale: Zal niet worden gedeeld tussen meerdere eenheden,

tenzij dit bijdraagt tot een betere veiligheid; kan worden aangetoond dat dergelijke uitwisseling niet significant zal belemmeren hun vermogen om hun veiligheid functies, waaronder uit te voeren, in het geval van een ongeval in een eenheid, een ordelijke afsluiten en afkoelen van de resterende eenheden.

Criterion 34. Systemen die splijtstoffen bevatten of radioactief materiaal: Moet uit te breiden tot de fysieke beveiliging van systemen, waaronder cyberveiligheid te vergemakkelijken, om te beschermen tegen radiologische sabotage en de waarborgen van speciale nucleair materiaal tegen diefstal en afleiding.

Criterion 37. Communicatiesystemen in de fabriek: Betrouwbaarheid van de communicatie moet worden vereist voor gebruik na al gepostuleerd initiërende gebeurtenissen en omstandigheden ongeval, met inbegrip van toepasselijke DBT's.

Criterion 38. Controle van de toegang tot de plant: specifieke fysieke toegangscontrole maatregelen moeten omvatten die nodig zijn voor het opsporen, beoordelen, en het uitstellen van bedreigingen van binnenuit voor installaties en machines aangewezen als van vitaal belang.

Criterion 42. Veiligheid analyse van de plant design: Verwachte operationele voorvallen (Aaos) en DBA's worden geëvalueerd in de veiligheidsanalyse en omvatten ontwerp van een fysieke bescherming systeem te beschermen tegen kwaadwillige handelingen.

Criterion 43. De prestaties van splijtstofelementen en samenstellingen: opgegeven aanvaardbare brandstof ontwerp grenzen mag niet worden overtreden voor de Aaos.

Criterion 44. Structurele vermogen van de reactorkern: Adressen intern gebeurtenissen. Splijtstofelementen zijn belangrijk voor de veiligheid beschouwd en daarom moeten de veiligheidsfuncties vervullen, waardoor de reactor shutdown en onderhouden van een koelbaar geometrie, onder interne en externe DBA gebeurtenissen.

Criterion 45. *Controle van de reactorkern : De reactorkern moet snel inherente nucleaire feedback karakteristieken moeten compenseren voor snelle reactiviteit inserties .*

Criterion 46. Reactor shutdown: Impliceert de opgegeven ontwerp limieten voor de brandstof niet worden overschreden voor de Aaos.

Criterion 50. Cleanup van koelmiddel van de reactor: Introductie van chemische stoffen moeten op zodanige wijze verbonden met de nucleaire veiligheid en radiologische risico's worden aangepakt en moeten chemische bescherming aan te pakken.

Criterion 54. Containment systeem voor de reactor: Moet omvatten specifiek “interne gebeurtenissen” en op de vraag van de “opsluiting” versus traditionele gebruik van “containment.”

Criterion 55. Controle van radioactieve releases van de insluiting: Eisen dat leakage testen worden uitgevoerd tijdens de ontwerpfase basis drukken.

Criterion 56. Isolatie van de insluiting Inconsistent met GDC 56, hetwelk terugslagkleppen niet kan worden gebruikt als automatische afsluiter buiten containment.

Criterion 58. *Controle van containment voorwaarden: Containment is ontworpen om de ergste DBA en / of SA omstandigheden te weerstaan .*

Criterion 61: Bescherming systeem: Beveiligingssysteem onafhankelijkheid dient te bestaan uit onafhankelijke treinen zodat een enkele storing de beschermende maatregelen worden voorkomen.

Criterion 66. Aanvullende controlekamer: Eisen voor de controlekamer moet ook gelden voor de aanvullende controlekamer.

Criterion 71. Werkwijze bemonsteringssystemen en postaccident bemonsteringssystemen: Proces bemonsteringssystemen en postaccident bemonsteringssystemen worden ontworpen dat de dosis voor een operator bemonstering van deze systemen is ALARA.

Criterion 75. Verlichting systemen: Redundant of uitgebreide dienst lampen worden gebruikt in high-straling gebieden om personeel te behouden aan vorderingen ALARA door vermindering van de frequentie van de verlichting vervangen. Design kenmerken moeten worden verstrekt tot het onderhoud van de verlichting mogelijk uit lagere straling gebieden.

Criterion 80. Fuel handling en opslagsystemen: Brandstof handling en opslagsystemen voor bestraalde en niet-bestraalde splijtstof moeten worden ontworpen om doses aan exploitanten ALARA handhaven.

Criterion 81. Ontwerp voor stralingsbescherming: De plant layout moet worden ontworpen om blootstelling en besmetting van bedienend personeel te minimaliseren door de toegang tot gebieden met stralingsrisico's en de gebieden van mogelijke besmetting. Ventilatiesystemen moeten worden ontworpen om personeel blootstelling te minimaliseren en de controle van de verspreiding van verontreiniging.

Criterion 82: middelen om straling: voorzieningen worden nabij de monitoren voor sanering van verontreinigde personeel of uitrusting.

16.2.4. De veiligheid doel en de doelstelling van een “praktische eliminatie”

Een belangrijk punt naar voren. Het is onmogelijk voor een ontwerp te overleven extreme gebeurtenissen, zoals een meteorinslag, een grote militaire aanval, of het uiteenvallen van de samenleving als gevolg van gebeurtenissen zoals politieke omwentelingen, “regime change” of massale supervolcanic uitbarstingen, onder anderen.

Dus binnen de grenzen van wat wordt beschouwd als door redeneren en logica als haalbaar en noodzakelijk is, kan de inherente problemen in het ontwerp worden aangepakt, zodat de effecten en gevolgen tot een minimum beperkt en gecontroleerd. Bovendien is het bekend dat beweren of kleine waarden afleiden van de kern schadefrequenties of LRF, met de huidige Probabilistic Safety Assessment (PSA) / PRA methoden leidt tot buitensporig lage en eigenlijk onbewijsbaar nummers. Het leidt ook tot een subjectieve beslissing welke is of kan een ondergrens of cutoff voor event pulsherhalingsfrequentie en vorderingen berekenen zelfs CDF van ongeveer 10^{-8} of minder zijn gegeven, ondanks gebrek aan gegevens en grote onzekerheid.

Voor een deel zijn deze enigszins misleidend lage frequenties met grote onzekerheden zijn ontstaan omdat de initiërende gebeurtenis frequenties en de daaropvolgende acties zelf zijn zeer onzeker. Deze onzekerheden zijn met name van belang voor de veiligheid van AR's (bijvoorbeeld in potentieel grote seismische evenementen, [US NRC, 1997](#) ; [EPRI et al, 2012](#) ; [TEPCO, 2012](#) , blz 437 ev..), Maar ook vanwege de overweldigende rol van menselijke fouten en onjuiste organisatorische besluitvorming in alle bekende ongevallen ([Reason, 1997](#) ; [Duffey en Saull 2008](#)), die bijdrage ook slecht vertegenwoordigd is, onvoldoende gemodelleerd, en vaak onderschat.

Deze moeilijkheden, en het potentieel grote gevolgen en implicaties design, hebben geleid tot het concept van de “praktische eliminatie”, zoals cursief te benadrukken in criterium 20 en featured in criterium 45.

De vermelde doel en het concept van praktische eliminatie ([Dudour en Carluet 2011](#) ; met cursief cursivering van mij).

Beperking van de gevolgen van een ongeluk situatie moet worden uitgesloten door het ontwerp:

- Hetzij omdat de uitvoering van mitigatie apparaten redelijkerwijs niet haalbaar is,
- Of, omdat de R & D worden ontwikkeld voor het aantonen van hun efficiëntie redelijkerwijs niet haalbaar is.
- *Het eerste ontwerp doel is dergelijke situaties fysiek onmogelijk te maken .*
- In overeenstemming met deed, “praktische eliminatie” aanvaardbaar is slechts voor een beperkt aantal zeer duidelijk omschreven situaties.

De “praktische eliminatie” van een ongeluk situatie vereist uitvoering van onafhankelijke betrouwbare ontwerp en een robuuste demonstratie van hun efficiëntie, bijvoorbeeld:

- Combinatie van actieve en passieve systemen,
- Inherente eigenschappen, en
 - Operationele procedures voor het verifiëren efficiëntie van beveiligingen (bijv dient inspecties in).

Voor het implementeren van een dergelijke doelstelling zijn principes voor het opzetten van een demonstratie van praktische eliminatie is een uiteenzetting ([Okano, 2014](#)) als volgt en zijn in overeenstemming met de gekoppelde deterministische en probabilistische veiligheidsbenaderingen eerder gegeven:

- Het bewijs wordt geleverd op een case-by-case benadering
- Deterministische basis, aangevuld met probabilistische studies
 - Algemene beginselen voor de deterministische demonstratie:
 - Kijk voor een volledige lijst van de daadwerkelijke opheffing situaties
 - Bepalingen invoeren om de gevolgen van het initiëren van het evenement te beperken
 - De nadruk moet worden gelegd op:
 - Preventie van situaties die leiden tot “cliff edge-effecten”
 - Efficiëntie en betrouwbaarheid van verzachtende bepalingen bestrijken een breder domein
 - Minder gevoelig voor common mode storing
 - probabilistische studies
 - Om volledigheid te garanderen en om de verwachte frequentie vast te stellen

Of en hoe dergelijke benaderingen, de begrippen waarvan er veel kandidaten en voorstellen, mogelijk is het onderwerp van de huidige ontwikkeling en is specifiek voor elke AR.

16.3. veiligheidsdoelstellingen en de indeling van geavanceerde vormen reactor

Er is geen globale of internationale consensus over de details van de nomenclatuur, veiligheidscriteria, of vergunningen methoden om nieuwe concepten en

ontwerpen. Gezien het feit dat het niet mogelijk is te dekken of te voorzien van alle toekomstige mogelijkheden of variaties in design en principes, de taak is hoe een aantal uniforme aanpak te waarborgen in de richting van het ontmoeten van een aantal afgesproken high-level veiligheid doelen. De belangrijke GIF inspanningen geleverd een gemeenschappelijk forum voor dergelijke discussies, evenals de inspanningen van een aantal nucleaire regelgevers om “harmoniseren” hun verschillende benaderingen, zonder afstand te doen van hun wettelijke nationale regelgevende instantie. Deze inspanningen hebben geresulteerd in de zogenaamde Safety referentieniveaus (SRLs), die voor bestaande reactoren elders samengevat ([WENRA, 2014](#)). Voor de nieuwe of AR's hier van belang, zijn er zeven hoog niveau SO afgekondigd en als volgt (vermeld [WENRA, 2009](#)), met “SO” en cursivering toegevoegd voor de duidelijkheid:

SO1 . Normaal bedrijf, abnormale gebeurtenissen en preventie van ongevallen

•

Het verminderen van de frequentie van abnormale gebeurtenissen door het versterken van capaciteit van de installatie om te blijven binnen de normale werking.

•

Het verminderen van de kans op escalatie van een ongeval situaties door het verbeteren van planten mogelijkheid om abnormale gebeurtenissen te controleren.

SO2 . Ongevallen zonder kern smelt

•

Zorgen dat ongelukken zonder meltdown geen externe radiologische invloed of slechts geringe radiologische effect induceren (in het bijzonder geen noodzaak jodiumprofylaxe, schuilen of evacueren).

•

Het verminderen, voor zover redelijkerwijs mogelijk is, de kern schade frequentie, waarbij rekening wordt gehouden met alle soorten van gevaren en mislukkingen en combinaties van de gebeurtenissen, en het vrijkomen van radioactief materiaal uit alle bronnen, het verstrekken van de nodige aandacht aan plaatsing en het ontwerp om de impact van alle verminderen externe gevaren en kwaadwillige handelingen.

SO3 . Ongevallen met kern smelt

•

Vermindering van mogelijke radioactieve lozingen in het milieu van ongelukken met kern smelt, ook op de lange termijn, door het volgen van de kwalitatieve criteria:

Ongevallen met meltdown dat zou leiden tot vroegtijdige of grote releases moeten praktisch worden geëlimineerd; voor ongevallen met kern smelt die niet praktisch zijn opgeheven, hebben ontwerp maatregelen die zullen worden genomen, zodat slechts een beperkte beschermende maatregelen in het gebied en de tijd nodig voor het publiek (geen permanente verplaatsing, geen noodzaak voor noodevacuatie buiten de directe omgeving van de plant, beperkte opvang, geen beperkingen op lange termijn van de voedselconsumptie) en dat er voldoende tijd beschikbaar is om deze maatregelen uit te voeren.

SO4 . Onafhankelijkheid tussen alle niveaus van de defensie-in-diepte

•

Verbetering van de effectiviteit van de onafhankelijkheid tussen alle niveaus van deed, met name door de diversiteit voorzieningen (in aanvulling op de versterking van elk van deze niveaus afzonderlijk behandeld in de voorgaande drie doelstellingen) te voorzien, voor zover redelijkerwijs mogelijk is, een algemene versterking van de Deed.

SO5 . Veiligheid en beveiliging interfaces

•

Ervoor zorgen dat de veiligheidsmaatregelen en beveiligingsmaatregelen worden ontworpen en op een geïntegreerde wijze uitgevoerd. De synergie tussen veiligheid en beveiliging verbeteringen moeten worden gezocht.

SO6 . Stralingsbescherming en afvalbeheer

•

Het verminderen van zo veel als redelijkerwijs mogelijk door het ontwerp bepalingen, voor alle besturingssystemen staten, stillegging en ontmanteling van activiteiten, individuele en collectieve doses voor werknemers, radioactieve en niet-radioactieve lozingen in het milieu, en de hoeveelheid en activiteit van radioactief afval.

SO7 . Het beheer van de veiligheid

•

Doeltreffend beheer van de veiligheid van de ontwerpfase. Dit impliceert dat de licentiehouders vaststelt effectief leiderschap en het beheer van de veiligheid over de gehele nieuwe fabriek project en heeft voldoende interne technische en financiële middelen om de primaire verantwoordelijkheid in veiligheid te vervullen; zorgt ervoor dat alle andere organisaties die betrokken zijn bij locatiekeuze, het ontwerp, de bouw, de inbedrijfstelling, de bedrijfsvoering en de ontmanteling van nieuwe reactoren te tonen bewustzijn bij de medewerkers van de nucleaire veiligheid in verband met hun werk en hun rol bij het waarborgen van de veiligheid.

We kunnen er allemaal over eens aan deze idealen. Dit zijn allemaal mooie woorden en met edele bedoelingen, maar ze maskeren nog steeds de complexiteit van de werkelijkheid, en dat doen ze niet overeen met dat veiligheid daadwerkelijk en in de praktijk (zoals ruimschoots aangetoond door Fukushima en de meeste industriële ongevallen) de verantwoordelijkheid van de exploitant / eigenaar van de plant, niet de toezichthouder. Het regelgevende proces, wat het ook is en waar het zich voordoet, gewoon uiteindelijk een vergunning verleent die minimumnormen of verwachtingen stelt voor de naleving door de eigenaar en operator, omdat alle regels en voorschriften zijn bedoeld om te doen. Het instellen en uitvoeren van de regelmatige veiligheid reviews, audits en inspecties van de activiteiten, wenselijk en noodzakelijk ze ook mogen zijn, kan en mag niet in de plaats voor de ontwerper en operator meedogenloos verbetering van de veiligheid ervaring, kennis, vaardigheid, voorlichting, training en verbintenis.

Afgezien van voor het moment de onvermijdelijke variabiliteit in detail en bij de uitvoering, kunnen we gemakkelijk de groep van de verschillende Generation IV (Gen IV), SMR en AR concepten gewoon volgens het medium benut en die nodig zijn voor het koelen van de primaire reactor. Deze drie media water (klasse B: water reactoren), gas (klasse G: gas reactoren) en vloeibaar metaal of zout (klasse L: vloeibaar metaal

/ saltreactoren), die ook gunstig is kenmerkend voor de veiligheid analysemethoden en claims met betrekking tot het voldoen aan de SO's.

Van beoordelingen en compendia van de huidige concepten en ontwerpen varianten, classificeren we voorbeelden van de verschillende begrippen, onder opgave van hun gepubliceerde namen en acroniemen in [tabel 16.1](#) . Deze weergave maakt duidelijk dat ondanks de alfabetische overvloed, met enkele niet meer verder wordt ontwikkeld of nog zuiver papier concepten en anderen (aangegeven met een sterretje) onder actieve constructie, allemaal onder dezelfde totale SO handhaving koelen, maar via verschillende middelen.

Tabel 16.1.

Classificaties van geavanceerde reactoren

Klasse B: water reactoren	Klasse G: gas reactoren	Klasse L: vloeibaar metaal / zout reactoren
AFPR-100 (Atoms for Peace Reactor; PNNL)	GFR (Gasgekoelde Fast Reactor)	Gen4 Module (GEN4 energie)
CAREM * (Spanje)	HTGR (High-Temperature Gasgekoelde Reactor; AREVA)	BREST * (loodgekoelde reactor; Rosatom)
SMR-160 (Small Modular Reactor; Holtec International)	PBMR (Pebble-Bed Modular Reactor)	Lopende golf reactor (TerraPower)
Mpower SMR (B & W)	GTHTGR (Gas Turbine High-Temperature Reactor)	JSFR (Japan) SFR (-natrium gekoelde snelle reactor, Verenigde Staten)
Hyperion (Gen4 energie)	VHTR (vhtr)	KALIMER-600 (Korea)
ACP100 SMR (China)	Antares (AREVA)	IMSR (Integrale gesmoltenzoutreactor; Terrestrial Energie)
IRIS (International Reactor innovatieve en veilige; Westinghouse)	Allegro-ALLIANCE (gas snelle reactor demonstrator; Europese Commissie)	SSS
SMR natuurlijke circulatie drukwaterreactor (NuScale)	SC-HTGR (Steam Cycle High Temperature Gasgekoelde Reactor)	Astrid * (Advanced Sodium Technology Reactor voor Industrial Demonstratie) (CEA Frankrijk)
W-SMR (Westinghouse Kleine Modular Reactor; Westinghouse)	EM ² (Energy Multiplier Module, General Atomics)	PFBR * (Prototype snelle kweekreactor; India)
SCWR (superkritischwaterreactor, superveilig; AECL)	Hybrid Power Technologies' geavanceerde reactor	PRISM (Power Reactor Innovatieve Kleine Module, General Electric)
HPLWR (High-Pressure Lichtwaterreactor)	NGNP (Next-Generation kerncentrale; NGNP Industry Alliance)	LC-E-SSTAR (LakeChime Evolutionaire Kleine Secure Transportable Reactor)
		BN-800 * (Rusland)

ANS, American Nuclear Society, 2014. Nuclear News 57, 43-85, US DOE, Amerikaanse ministerie van Energie Bureau van de kernenergie, 2014. Geavanceerde Reactor Concepts Technical Review Panel openbaar verslag. <http://www.energy.gov/ne/downloads/advance-reactor-concepts-technical-review-panel-public-report> , Goldberg, SM, Rosner, R., 2011. Nuclear Reactors: generatie op generatie. American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, MA, <https://www.amacad.org/pdfs/nuclearReactors.pdf> en GIF, Generation IV International Forum, 2014b. Technology Roadmap Update voor Generation IV Nuclear Energy

In het belang van het minimaliseren van onnodige complexiteit en de indeling te helpen, hebben we de vermelding in een aantal [tabel 16.1](#) naar de grote AR varianten en meer volwassen gepubliceerd concepten als een voorbeeld van de vele en gevarieerde verschillende regelingen. Geïnteresseerde lezers zullen vele varianten voorgesteld die in verschillende stadia van rijpheid, de levensvatbaarheid en de ontwikkeling en kunnen hun eigen oordeel over de realiteit en haalbaarheid van commerciële implementatie te maken.

De basisconfiguratie van de AR's zijn ook gelijk. Allemaal een primaire kringloop voor het onttrekken van warmte uit de reactorkern, binnenin een soort drukdragende vat, kanaal of vat, met een warmtewisselaar (HEX) of directe fietsen naar een turbine. De cyclus efficiëntie en fysieke lay-outs zijn allemaal adequaat elders beschreven (in het hoofdstuk: [Inleiding: een overzicht van de status van de elektriciteitsproductie in de wereld](#) , deel 1 en Bijlage: [Extra materialen \(schema's, lay-outs, T - s diagrammen, fundamentele parameters, en foto's \)](#) op de thermische en kerncentrales van dit handboek, en de referenties aan [tabel 16.1](#)), en hoeven hier niet te worden herhaald. De veiligheidsdetails tussen ontwerpen binnen een bepaalde klasse onderscheiden zich door de inherente verschillen in werktemperaturen en drukken koelmiddel warmtecapaciteit natuurlijke circulatie stromen reactor reactiviteit coëfficiënten en fysieke kracht grenzen, die alle leiden tot verschillende ongevallen mogelijkheden en event progressie. Enige en alle voorstanders zullen, en te doen, formeel beweren dat ze de SO vergaderen als een noodzakelijke voorwaarde voor acceptatie.

Dus zijn deze concepten veilig? Zijn sommige “veiliger” zijn dan anderen? En hoe weten we dat?

We kunnen niet zomaar wenden tot resultaten of beraadslagingen in de vergunningverlening hier omdat deze zijn niet alleen nog steeds in opkomst, maar ook bewust geen analyse van betrekkelijke veiligheid, zoals ook het geval is met commerciële vliegtuigen. Technologische innovatie ook leidt over het algemeen tot en vergunningverlening, niet andersom, zoals duidelijk blijkt uit de evolutie van computers, auto's, en moderne medicijnen. De huidige benaderingen en oorsprong aan veiligheid en toelating reactor op basis van water reactor traditie en zijn niet direct toepasbaar op dergelijke verschillende concepten in [tabel 16.1](#) . In de Verenigde Staten, zijn woord wijzigingen in NRC vergunningen en regelgeving voorgesteld om dit probleem aan te pakken en de toepasbaarheid van de bestaande methoden en veiligheidscriteria uit te breiden naar onder meer gekozen anderen klassen G en L dan alleen Klasse W ([INL, 2014](#)).

Onafhankelijk van reactor klasse, bestaande modern veiligheid analyses zijn gebaseerd op de twee richtingen van (1) beoordeling van potentiële gebeurtenis initiatoren en kwantificeren schattingen van de sequentie evolutie en reacties gebruikt PSA / PRA en (2) deterministische Analyses (DA) waarbij gepostuleerd gebeurtenissen geanalyseerd mate onafhankelijk van de waarschijnlijkheid. Combinaties van vele evenementen, transiënten, en mislukkingen worden beschouwd, van eenvoudige verstoringen tot verlies van de macht, aardbevingen, bosbranden en overstromingen.

Deze twee methoden zijn in overeenstemming met de vijf stadia van de generieke Integrated Safety Analysis Methodology (ISAM) geopperd door de GIF Risk and Safety Working Group ([GIF, 2014b](#) , blz. 59). De algemene methodiek is openlijk

gepubliceerd ([GIF, 2011](#)) en bevat specifieke richtlijnen voor gebruik ([GIF, 2014a](#)). De ISAM gereedschappen / stadia zijn vermeld in de Roadmap-update als volgt:

- Kwalitatieve veiligheidseisen / karakteristiek beoordeling genoemd,
- Phenomena Identificatie en Ranking Table,
 - Doelstelling bepaling boom,
 - DA en fenomenologische analyses en
 - PSA.

Omdat noch deterministische of probabilistische methoden zijn perfect voor het vaststellen veiligheidsmarges of schade of activiteit vrijlating waarschijnlijkheden, noch hebben ze laten opnemen van alle mogelijke scenario's, de kennelijke bedoeling is dat de een de ander moeten aanvullen.

De contrasten en complementaire aspecten tussen de benaderingen samengevat op topniveau in [ASME \(2012\)](#) en zijn in meer detail getoond in [tabel 16.2](#) . PRA / PSA nominaal meer inclusieve, realistisch, en de algemene en DA is veel meer gestileerd en arbitrair. Zoals te zien is, hebben beide beperkingen, maar bieden uitstekende ondersteuning, maar zijn geen vervanging voor, oordeel veiligheid.

Tabel 16.2.

Samenvatting en vergelijking van probabilistische risicobeoordeling / probabilistische veiligheidsevaluatie en deterministische analyse benaderingen

veiligheidsaspect	PRA / PSA aanpak	DA aanpak	Notitie
Methode	Storing en event bomen, plus scoping	Complex veiligheidscodes	Brede scope versus smalle focus
initiërende gebeurtenissen	Frequentie van voorkomen	geselecteerde belangrijke	Bedek "what if" scenario's
mislukkingen	probabilistisch	Single en / of slechtste	oordeel betrokken
Begincondities	Nominale of "best estimate"	Het beperken of "conservatief"	oordeel betrokken
Aantal sequenties	Beperkt door cutoff en het belang	Beperkt door edict en selectie	oordeel betrokken
externe gebeurtenissen	Brand, overstroming, aardbeving, tornado, bedreigingen	randvoorwaarde	Grote onzekerheid voor "zeldzame" events
Behandeling van onzekerheden	Inclusief het gebruik van distributies	Variërende in- en bemonsteringsuitgangssignalen	Ontbrekende gegevens en systematische fouten
Veiligheidsmaatregel	Kern schadefrequentie	Veiligheidsgrens marge	Beide zijn niet koelen of controlekern
Gevolgen en off-	Inbegrepen en gekoppeld	uitgesloten	Ondersteunt

veiligheidsaspect	PRA / PSA aanpak	DA aanpak	Notitie
site effecten			noodmaatregelen
Veiligheidssystemen operatie	betrouwbaarheidsanalyse	Defined functioneren	Sterke band te ontwerpen
menselijk handelen	Inbegrepen en / of dynamische	Uitgesloten en / of statische	grote onzekerheid
Passieve veiligheidssystemen	ingesloten	In het ontwerp basis	Claims versus realiteit
managementcultuur	Inbegrepen via HRA	uitgesloten	niet meetbaar
Apparatuur onderhoud en de exploitatie	Opgenomen via betrouwbaarheidsbeoordeling	Onbekend	beperkte gegevens
resultaten	Relatieve ranking van risico	absolute marge	Wordt gebruikt voor het ontwerp en de beslissingen over licenties
beperkingen	Te kleine aantallen en de beperkte behandeling van mensen	Alleen willekeurig en gestileerde sequenties	Potentieel voor overmatig te vertrouwen op papier versus "echte" safety
Licensing gebruik	Risico informeren en screening	bevestiging marge in design	Regulatory inflexibiliteit

PRA , probabilistische risicobeoordeling; *PSA* , probabilistische veiligheidsbeoordeling; *DA* , deterministische analyses; *HRA* , menselijke fout analyse.

[tabelopties](#)

Aan te pakken en het verbeteren van de veiligheid analyse, en om de belangrijkste onzekerheden in de aanpak van extreme ongevallen aan te pakken, de belangrijkste ontwikkeling aanpak houdt dus in dat radicaal het verbeteren en vereenvoudigen van zowel het ontwerp en de vergunning van

Verbetering en vereenvoudiging van de veiligheidsanalyse;

Het maken van alle veiligheids- en besturingssystemen robuuster;

Waarborging meer "inherent" veiligheid;

Het wegwerken van de vele mogelijke initiërende gebeurtenissen;

Die minder actieve systemen kleppen, pompen en actuatoren;

Het verminderen van de behoefte aan menselijke interventie en / of acties van de operator;

Verschaffen onbepaald koelen en / of warmteafvoer;

Het elimineren of verminderen van de kans op kernschade;

Verbetering van emergency response effectiviteit;

Het verminderen van het potentieel voor offsite releases;

Het hebben van meer gestandaardiseerde of modulaire structuren; en

Het uitvoeren van objectieve onafhankelijke veiligheid stress testing.

Op hetzelfde moment, de aanpak van het verlagen van de kosten en risico's hoofdstad impliceert vaak serie bouw van meerdere, misschien kleinere eenheden, soms gebruik te maken van gemeenschappelijke diensten en sites en minder personeel, die allemaal van invloed op de kans op onverwachte veiligheid interacties. Daarnaast raden sommige opties met behulp van externe locaties en alternatieve configuraties, zoals opsluiting gebouwen of ondergrondse silo's, die ook de geologische en topologische risico evenals logistieke en noodhulp aspecten reactie beïnvloeden.

16.4. Generieke veiligheidsdoelstellingen en veiligheidsbarrières

Fysiek, die voldoen aan de SO betekent brengen en houden controle te allen tijde, plus ultieme en voor onbepaalde tijd durende heat sinks (UIHS). In wezen, kunnen we deze vereenvoudigen door die niveaus van procesveiligheid "barrières" (zie bv, [Bea en Gale, 2011](#) , blz. 5-11), wat overeenkomt met diep gelaagde deed. In deze verwijzing, zijn de barrières die als pro-actief, reactief en interactief en kunnen fysieke, procedurele en bestuurlijke zijn. Vandaar, gezien het feit of omzeilen van één of meerdere lagen nodig waarmee de veiligheid ontwerpfilosofie, waarin gegevens en voorspellende onzekerheid groeit met het falen, bypass of overschrijding van elke laag.

De veiligheid ontwerp doelstellingen van de barrières in nieuwe IT-systemen worden in de volgende.

16.4.1. Verminder de kans op ontstaan van evenementen

De kans op incidenten en gebeurtenissen geminimaliseerd door te zorgen voor een hoge betrouwbaarheid van actieve systemen effectieve bediening van passieve systemen, en het opleggen voldoende operationele marge. Naast robuust ontwerp en constructie van het primaire systeem worden gebouwen, componenten, buizen en systemen additionele marge in kern thermische grenzen, redundantie en diversiteit in uitschakeling en veiligheidssysteem implementatie en veilig en regelapparatuur. Dit vereist aandacht voor de kernfysica en brandstof ontwerp nietig, temperatuur verschaffen, en kracht reactiviteit coëfficiënten met voldoende marge die automatisch zorgt verminderen en / of beperken van de reactor vermogen voor alle denkbare en gepostuleerde overgangen [bv ATWS of verlies van koelmiddel accident (LOCA) samenvalt met het verlies van off-site macht]. Meerdere veiligheidssystemen en instrumentatie bieden monitoring en controle mogelijkheden voor alle normale en verstoorde omstandigheden.

Bijna alle "routine" transiënten wordt verwacht dat goedaardige resultaten, zonder dat de kern schade. Daarom uitdagingen slechts sprake van grote structurele of systeemschade, primaire breuken systeem, en / of ernstige uitgebreid verlies van externe stroom of koelwater.

De gebruikte werkwijzen omvatten bedrijfservaring en gebeurtenisgegevens, geotektonische historische gegevens, gekoppeld neutronische-thermische-hydraulische transiënte prestatieanalyse codes, Computer Aided Design Computer Aided Engineering (CAD-CAE) systemen, structurele eindige-elementenmethode, materialen spanningsanalyse, menselijke fout analyse, risicobeoordeling en PRA.

16.4.2. Zorgen voor langdurige koeling

Ondanks voldoen doelstelling circulatie 1 stabiele langdurige en / of warmtestraling, moet warmteafvoer uit de kern zijn aangebracht. Dat wil zeggen ervoor zorgen verwijdering van vervalwarmte te allen tijde een ultieme koudebron zoals de atmosfeer, met inbegrip van situaties waarin alle vermogen (buiten raster kabels en vanuit generatoren en batterijen) kwijt langere tijden. De andere bedoeling is om een minimum te beperken of overbodig menselijk handelen, omdat deze zijn zelf de oorzaak van fouten en ongevallen.

Sommige van de benaderingen die zijn onderzocht op AR-systemen zijn de volgende:

- Zorg voor natuurlijke circulatie loops voor systemen met inherent grote warmtecapaciteit koelmiddelen of moderators.
- Ontwerp voor een snelle drukverlaging om het water injectie te worden bijgestaan door het gebruik van opluchting of “squib” kleppen en meerdere lussen.
- Verwerk hoge hydrostatische hoofden, terugslagkleppen, HEXs, en stoom condensors naar natuurlijke circulatie te helpen, en vijvers, zonder dat acties van de operator over een lange tijd.

Daarom is de enige uitdagingen zijn bij het waarborgen van voldoende warmteafvoer en voldoende water en voeding voor de tijdschalen en ervoor te zorgen dat de UIHS en integriteit van het systeem wordt gehandhaafd.

De gebruikte werkwijzen omvatten gevalideerde thermische-hydraulische codes (zie [Sectie 16.10](#)), systeem en betrouwbaarheid componentenanalyse en PRA.

16.4.3. Zorgen voor de effectieve verwijdering van BHV

Een GIF veiligheid doel is om in wezen elimineren de noodzaak voor emergency response, zo te voorkomen evacuatie eisen voor mensen in uw omgeving en elke vorm van bodemverontreiniging. Mits doelstellingen 1 en 2 is voldaan, maar uitgaande falende barrière Dit doel vereist hoofdzaak voorkomen kernschade; het handhaven van inperking of opsluiting integriteit; en het verstrekken van volledig robuuste seismic-, met terroristen, en tornado-proof systemen en structuren. Extra opties omvatten ook ondergrondse reactor gebouwen aan de “target” en gefilterd ventilatie om mogelijke overdrukken te controleren en eventuele radioactiviteit vrijkomen verminderen.

De problemen die overblijven in feite bewijzen dat releases absoluut niet optreden (gezien het is moeilijk te bewijzen negatief en dergelijke data schaars) en dat alle potentiële kernschade toestanden ofwel voorkomen en / of voldoende gekoeld. De gebruikte werkwijzen omvatten SA analyse codes; structuuranalyse falingswijze; transport van radionucliden in gebouwen en het milieu; historisch geotechnische, hydraulisch, en seismische respons analyse; en PRA's.

16.4.4. Beheren zeldzame en extreme gebeurtenissen

Ondanks de vergadering Doelstelling 3, moet REE worden beschouwd dat natuurlijke gebeurtenissen in samenwerking met of het veroorzaken van het falen van de

infrastructuur (zowel on- als off-site) en intense maatschappelijke ontwrichting te pakken. Deze kunnen ook extreme of-tsunami veroorzaakte ongecontroleerde overstromingen, grote ijs stormen, stoten vliegtuigen, branden, en seismische en terroristische dreigingen, in combinatie of in verband met grote storingen aan de macht, controle en systemen.

Bij zogenaamd stresstests worden dergelijke extreme scenario beschouwd als de mogelijkheid te reageren en controle te behouden testen, waardoor degradatie, en het vermijden noncoolable gesmolten kern configuraties (door “kernvangers” of betonnen gebouw basismat beschermers) en explosies als gevolg van ongecontroleerde waterstofproductie (zoals het geval was bij Fukushima), met inbegrip van kwetsbaarder structuren. Daarom uitdagingen zijn bij het bepalen van de grenzen van de scenario's te worden beschouwd, in het voorspellen van het verloop van dergelijke gebeurtenissen, en in de inzet van de nooduitrusting in een tijdig (bijvoorbeeld, zoals in het FLEX “coping-strategieën”, [NEI, 2012](#)), om te helpen om een beheerde reactie die paniek en ontzetting vermijdt garanderen. De gebruikte werkwijzen omvatten risicobeoordeling, PRA, gasvormige meng- en explosie analyse en SA en bijgevolg codes.

16.4.5. Zorg ervoor Rickover waarborgen voor openbare welzijn

Ondanks de verwezenlijking van de doelstellingen 1-4, die essentieel zijn fysieke barrières, zijn er de andere belangrijke aspecten van corporate, management, en regelgevende veiligheid die aandacht vereisen. Alle belangrijke gebeurtenissen omvatten een mislukking van de veiligheidsprestaties op senior management niveau als op operationeel niveau, plus een onbedoelde nadruk op het proces productie over de veiligheid proces.

Deze menselijke prestaties belemmeringen zijn niet alleen de laatste lijn van verdediging; ze zijn inderdaad de lijm die de volledige veiligheid gebouw bij elkaar houdt. Het is algemeen bekend dat het hebben van de juiste houding, training, nadruk, beloningen structuur, werkomgeving, en filosofie, die alle steun veiligheid, zijn de sleutel tot een effectieve uitvoering en effectieve veiligheid en proces management. Deze daadwerkelijke menselijke prestaties veel verder gaat dan de traditionele menselijke fout analyse over de taakuitvoering te overwegen en te vertegenwoordigen het verschil tussen de vorderingen en de werkelijkheid over de veiligheid “cultuur” en risicomijdend gedrag. Het is een noodzakelijke maar niet voldoende voorwaarde dat de licentie eigenaar-operator en de vormgeving autoriteit voldoen aan alle voorschriften en eisen, maar ze moeten nog steeds alleen de veiligheid lasten en het risico te dragen. De toezichthouder stelt de normen, terwijl het management stelt de verwachtingen en voldoet aan de doelstellingen. Daarom uitdagingen blijven bestaan, niet alleen in het waarborgen van de hoogste normen van veiligheid prestaties, persoonlijke verantwoordelijkheid, en attitudes maar ook in het meten en continu verbeteren van diezelfde prestaties. Sociale en maatschappelijke acceptatie gewonnen moet worden, niet door slogans, maar door het voorbeeld, en bewaard door oneindige nadruk op veiligheid. Dit geldt in het bijzonder en die nodig zijn voor elke nieuwe technologie (nl. De commerciële luchtvaartindustrie).

De gebruikte methoden omvatten het verstrekken van een leeromgeving en effectieve informele kwestie communicatie, onafhankelijke analyse, Red Teams (kritische onafhankelijke beoordelaars), management benchmarking, inspecties,

veiligheidsprestaties audits, on-site aanwezigheid, intensieve “bottom-up” rapportage, en de meeste van alle waarborgen van persoonlijke verantwoordelijkheid en verantwoording.

De logische hiërarchie aanvoeren ISAM is als volgt [zie [Fig. 3](#) in [GIF \(2014a\)](#)]:

Veiligheid doelen en doelstellingen

Fundamentele veiligheidsfuncties

Probabilistische succescriteria

Deterministische succescriteria

DiD niveaus:

1-preventie

2e-surveillance en controle

3-ongevallen beheer

4e-Control van de zware omstandigheden en mitigatie

5-Mitigation van radiologische gevolgen

16.5. Risico informeren veiligheidseisen door te leren van eerdere gebeurtenissen

Het is belangrijk om te leren van de werkelijke gebeurtenissen ([Duffey en Saull 2008](#)), en AR's zijn geen uitzondering. Zelfs met de enorme zeldzame gebeurtenissen, zijn er veel mogelijkheden om te leren van meer frequent voorkomen. Voor het onderzoeken en leren van bekende gebeurtenissen, precursoren, en ongevallen, heeft een bepaalde procedurele formaliteit bleek dat aan de verbetering van de operationele en “echt” in plaats van hypothetische veiligheid relevant is. Typische die wordt gebruikt voor event onderzoeken falende barrière toewijzing “oorzakenanalyse,” en formele invallende beoordelingen weergegeven in het volgende.

Ongevallenonderzoek Terminologie (zie [fig. 1](#) -9 in [US DOE \(2015\)](#))

Een **oorzakelijke factor** is een gebeurtenis of aandoening bij het ongeval sequentie die bijdraagt tot het ongewenste resultaat. Er zijn drie soorten oorzakelijke factoren: directe oorzaak (s), die onmiddellijk event (s) of aandoening (en) die het ongeval; oorzaak (s), welke de oorzakelijke factor die, indien gecorrigeerd zou herhaling van het ongeval te voorkomen; en de bijdragende oorzakelijke factoren, die de oorzakelijke factoren die gezamenlijk met de andere oorzaken verhogen de kans op een ongeval zijn, maar die niet het ongeval veroorzaken.

De **directe oorzaak** van een ongeval het directe event (s) of aandoening (en) die het ongeval veroorzaakte.

Diepere oorzaken zijn de oorzakelijke factoren die, indien gecorrigeerd, zou herhaling van dezelfde of soortgelijke ongelukken te voorkomen. Hoofdoorzaken kunnen afgeleid zijn van of omvatten meerdere bijdragende oorzaken. Ze zijn van een hogere orde, fundamentele oorzakelijke factoren die klassen aan te pakken tekortkomingen, in plaats van enkele problemen of storingen.

Systemische onderliggende oorzaken leiden tot een tekort in een management systeem dat, indien gecorrigeerd, zou het optreden van een klasse van ongelukken te voorkomen.

Lokale onderliggende oorzaken leiden tot een specifiek tekort dat, indien gecorrigeerd, zou herhaling van hetzelfde ongeval te voorkomen.

Bijdragende oorzaken zijn gebeurtenissen of omstandigheden die de kans op een ongeval samen met andere oorzaken verhoogd, maar dat werkte individueel niet het ongeval veroorzaken. Bijdragende oorzaken kunnen zijn langdurige voorwaarden of een reeks van gebeurtenissen in het verleden dat, alleen al voldoende om het ongeval te veroorzaken waren niet, maar die nodig zijn voor het te voorkomen was. Bijdragende oorzaken zijn de gebeurtenissen en omstandigheden die “de weg geëffend” voor het evenement en, indien toegestaan om aanhouden of terugkeren, verhogen de kans op toekomstige gebeurtenissen of ongevallen.

Gebeurtenis en oorzakelijke factoren analyse omvat grafieken die de logische volgorde van gebeurtenissen en voorwaarden (oorzakelijke factoren die manier konden het ongeval optreden) toont en het gebruik van deductie om de gebeurtenissen of omstandigheden die hebben bijgedragen aan het ongeval te bepalen.

Barrier analyse een overzicht van de risico's, de doelstellingen (mensen of objecten) van de risico's en de controles of barrières die het management systemen opgezet om de risico's te scheiden van de doelstellingen. Barrières kunnen fysiek of administratief zijn.

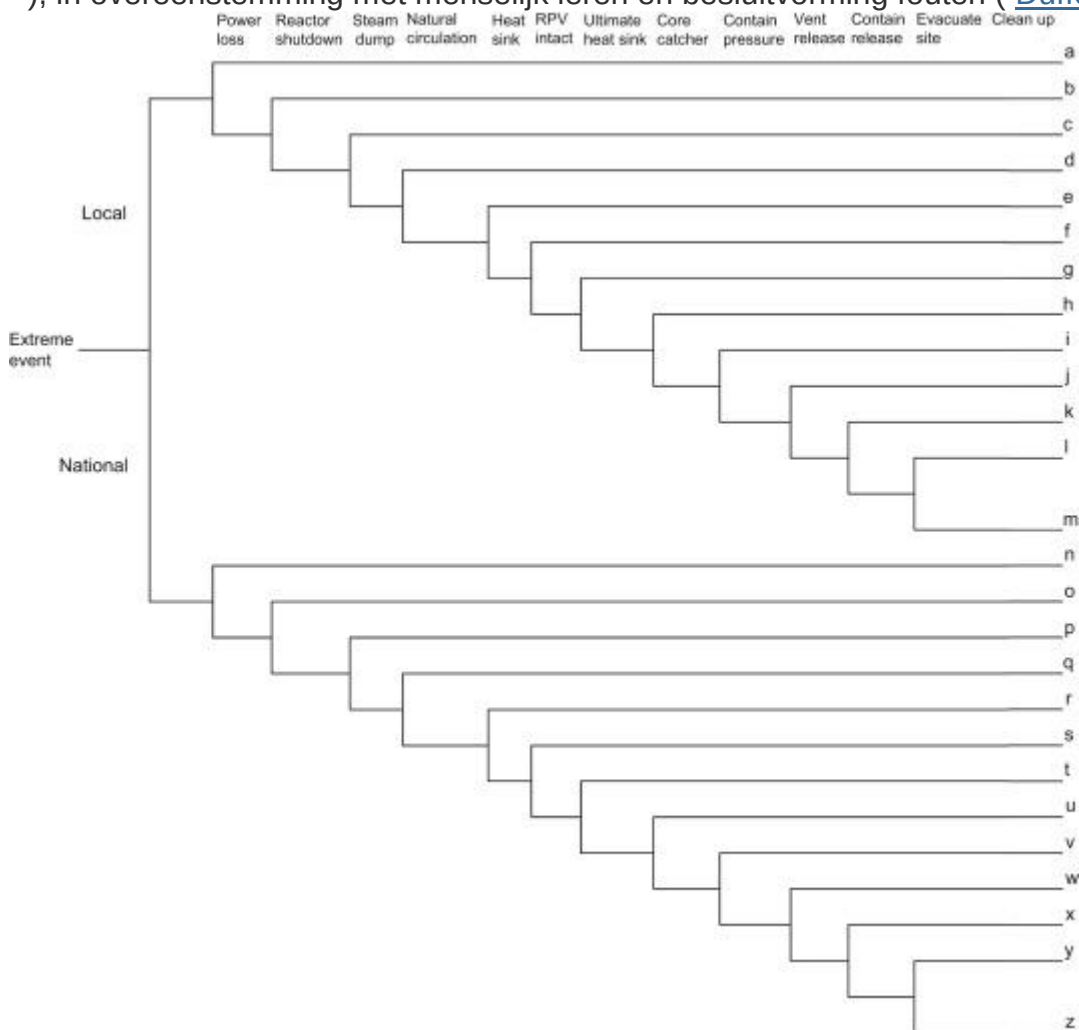
Verandering analyse is een systematische aanpak die geplande of ongeplande veranderingen in een systeem dat de ongewenste resultaten met betrekking tot het ongeval heeft veroorzaakt onderzoekt.

Fout voorloper analyse identificeert de specifieke fout voorlopers die bestaan op het moment van of voorafgaand aan het ongeval waren. Error voorlopers zijn ongunstige factoren of omstandigheden ingebed in de werkomgeving dat de kans op fouten tijdens het uitvoeren van een bepaalde taak door een bepaalde persoon of groep van individuen te verhogen. Fout voorlopers maken een fout-waarschijnlijke geval dat doorgaans bestaat wanneer de eisen van de taak hoger zijn dan de mogelijkheden van de persoon of wanneer het werk een ongunstige invloed op de beperkingen van de menselijke natuur.

Merk op dat “barrier analyse” is een belangrijke stap, omdat principieel omvat WIsT, zoals die aangevoerd tegen radioactiviteit afgifte (brandstof / hoofdsysteem / containment) en een aanpassing van de “vlinderdas” methode die gewoonlijk werd toegepast aan de hand van de olie- en gasindustrie. Het is echter nu bekend dat dergelijke fysieke, procedurele, administratieve en bestuurlijke lagen kunnen worden geschonden, omzeild of ondoeltreffend of verergerd door menselijk handelen en de daaropvolgende verlies van controle gemaakt, zoals wordt geïllustreerd door meerdere SA's, zoals de Three Mile Island verlies van koelvloeistof, Davis-Besse hoofd corrosie, Fukushima kern smelt en explosies, de Concorde en Air France AF447 neerstortende vliegtuigen, en de Deepwater Horizon offshore-olie-spill evenementen ([Duffey, 2015](#)).

Een fictieve voorbeeld van een “barrière tree” voor een verlies van elektrisch Fukushima-gebeurtenistype wordt gegeven in [Fig. 16.2](#) , waarvan ongeveer 10 niveaus van lichamelijke, procedurele, operationele en bestuurlijke barrières heeft. Gegevensverzameling en analyse van grote evenementen geven aan dat

dergelijke belemmeringen worden doordrongen en omzeild door menselijk handelen, beslissingen en gedrag met een totale waarschijnlijkheid die groter is dan Order (10^{-3}), in overeenstemming met menselijk leren en besluitvorming fouten ([Duffey 2015](#)).



Figuur 16.2.
Notionele barrière boom voor kerncentrale.

[Figuur opties](#)

16.6. Belangrijke technische veiligheidsproblemen

We kunnen verder classificeren de belangrijkste generieke technische veiligheidsproblemen voor elk van de drie klassen, W, G en L, met behulp van informatie die afkomstig is uit ervaring en de gepubliceerde literatuur zoals gegeven in de volgende discussies op basis van materiaal uit de GIF ([GIF, 2014b](#) ; [Kelly, 2014](#) ; met toestemming).

Veiligheid ontwerp zal gaan bereiken GIF goals (aangepast van [Kelly, 2014](#)):

Vhtr (VHTR) veiligheid (klasse G) : Beperkt tot 600 MW (thermisch); grote thermische traagheid van grafiet structuur matrix; brandstof beneden 1600 ° C, eenfasige inerte koelvloeistof beschadigd.

SFR veiligheid (klasse L) : inherente eigenschappen zoals natuurlijke circuitkoeling en uitzetting van de brandstof; eenfasige koelmiddel met hoge marge koken.

Superkritische watergekoelde reactor (SCWR) veiligheid (klasse L) : Single-fase koelmiddel; passieve veiligheidssystemen.

Gasgekoelde snelle reactor (GFR) veiligheid (klasse G) : Zeer hoge temperaturen brandstof; complex ontworpen veiligheidssystemen.

Vloeibaar metaal gekoelde snelle reactor (LMFR) veiligheid (klasse L) : Single-fase hoge-enthalpie koelmiddel; ruime marge aan het koken; ontvankelijk voor natuurlijke circulatie koeling.

Gesmoltenzoutreactor (MSR) veiligheid (klasse L) : Geen mogelijkheid van de brandstof smelt; lage splijtbare inventaris; relatief lage splijting productvoorraad.

Deze top-level doelen zijn uitgebreid in meer detail als volgt, waarin we de GIF discussie generiek voor alle systemen voor de juiste AR klasse hebben gemaakt.

Klasse W ([GIF, 2014b](#) , blz. 45):

De SCWR licentie zal worden gegeven wanneer is voldaan aan ten minste deze strenge eisen. Meer in het bijzonder, de Fukushima Daiichi ongeval de noodzaak aangetoond van passieve restwarmte verwijdering gedurende lange perioden en het SCWR moet dienovereenkomstig worden ontworpen.

Voor SCWR, met een zeer hoge druk (25 MPa), hoge-temperatuur systeem de drukverlaging prijzen en krachten potentieel groter dan in de huidige lichtwaterreactoren (LWR). Voor beide begrippen van een reactordrukvat (RPV) of drukbuis (PT) moeten beide aantonen dat een eenvoudige LOCA of RPV of PT wegens scheuren of schade, niet tot kernschade.

In het basisconcept van de RPV versie ([Oka en Mori, 2014](#)), is de klassieke LWR voorbijgaande analyse gebruikt. Voor de PT-versie, is totaal verlies van stroom en koeling aangesproken als in de klasse G-systemen, met behulp van straling koelen tot een UIHS. In beide gevallen wordt de veiligheid doel en de vereiste koeling en aldus aan brandstof smelten en / of kern schade onbepaalde tijdsschalen voorkomen, zelfs voor BDBAs en REE ([Yetisir et al., 2015](#)).

Voor dergelijke klasse W systemen grote warmteafvoer mechanisme ingeroepen interne circulatie (vaak “passief”), niet alleen in het primaire systeem, maar in back-up afkoelen en de uiteindelijke warmteafgifte een UIHS die gewoonlijk atmosfeer of de aarde.

De beslissing te bepalen dat er geen meltdown voor alle-loss-of koeling gebeurtenissen heeft geleid tot de SCWR-PT-concept met warmtestraling als enig koelmechanisme dat ervoor zorgt dat bekleed en brandstof smelten niet mogelijk ([Yetisir et al. , 2015](#)). In de NuScale AR concept, de vereiste koeling te handhaven onbepaalde tijd heeft geleid tot een aantal natuurlijke circulatie paden.

Klasse G ([GIF, 2014b](#) , blz. 21):

Voor GFRs,

De behoefte (is) om robuuste nakoelstrang (DHR) te waarborgen, zonder externe voeding input, zelfs in drukloze omstandigheden, wordt nu beschouwd als een vereiste. Vorige concepten gebruikte elektrische (batterij) aangedreven blowers aan drukloze DHR behandelen. Hoewel het DHR systeem geen dieselmotoren die bescherming behoeven tegen mogelijke overstromingen, wordt de integriteit van de elektrische infrastructuur volgende extreme geval nog steeds vereist.

Het werk is nodig op twee fronten; eerst om de kans op volledige drukverlaging te verminderen en ten tweede om de autonomie van de DHR systeem te vergroten door het gebruik van zelf-aangedreven systemen. Hoewel deze self-aangedreven systemen niet passief kan worden beschouwd, ze vereisen geen externe voeding

input. Ten slotte is de strategie om te gaan met ernstige ongevallen tot stand wordt gebracht.

De GFR heeft ook een snelle opwarming van verlies van koeling, die zoals eerder vermeld kan alleen worden gehandhaafd als stroom naar gas circulatiepompen (pompen) beschikbaar is, dat dan betekent hoge temperaturen bestendige brandstof nodig. Dit heeft geleid tot de goedkeuring van de zogenaamde deeltje of kiezel brandstof. Daarnaast RPV of primair falen van het systeem is moeilijk, en dus aandacht is zelfs gegeven in het verleden om klasse G met behulp van voorgespannen beton schepen.

De noodzaak om te leiden en te onderhouden aantal natuurlijke circuitkoeling is zeer veeleisend voor dergelijke hoge vermogensdichtheid concept, wat resulteert in meerdere lagen back-up gas circulatiepompen en voedingen.

Klasse G ([GIF, 2014b](#) , blz. 51):

Voor VHTR,

DHR passieve systemen zijn ontworpen om de werking van de VHTR vergemakkelijken met het einddoel eenvoudige bediening en transparante veiligheidsconcepten. -Proeven zijn gepland om passieve eigenschappen van het systeem te controleren en aan te tonen dat de veiligheidsmarges voldoendeDesign-basis en buitenontwerp-ongevallen-basis ongevalanalyse voor VHTR moet fenomenen zoals chemische aantasting van grafietische kernmaterialen omvatten, kenmerkend door lucht of water binnendringen. Adequaatheid van de bestaande modellen zullen moeten worden beoordeeld, en de nieuwe modellen kunnen worden ontwikkeld en gevalideerd.”

Verdere demonstratie van de veiligheid prestaties voor zowel de prismatische en kiezel-bed concepten bij hoge temperatuur testreactor (HTTR) en HTR-10 benadrukken het belang van de sterke negatieve temperatuurcoëfficiënt van de reactiviteit, de hoge warmtecapaciteit van de grafietkern de grote temperatuurstijging marge en de robuustheid tri-isotrope brandstof produceren van een reactor concept dat niet off-site stroomproductie hoeft te meervoudige storingen of ernstige natuurlijke gebeurtenissen opgetreden in de Fukushima Daiichi kerncentrale overleven.

Vanwege de noodzaak binnendringend moderator of water die potentieel explosieve waterstof kan produceren voor interactie met het hete grafiet te beperken (bijvoorbeeld $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$), dit heeft geleid tot onderzoek van goedkeuring inert gas HEXs (bijvoorbeeld met behulp van superkritisch CO_2).

Klasse L ([GIF, 2014b](#) , p 10 en p 34..):

Voor de SFR,

... inspanningen zijn gericht op ... veiligheid en werking (verbetering kern inherente veiligheid en I & C), preventie en vermindering van natrium branden, preventie en verzachting van ernstige ongelukken met grote energievrees en ultieme koudebron.

Bovendien, speciaal voor de SFR, is er een “designer's choice” als gevolg van de veiligheid ([Anzieu et al, 2014.](#) , Die deels staat stellen dat ondertitelde Applied Gen IV Criteria voor ASTRID):

12. Prompt kritikaliteit wordt evenmin bereikbaar kern compaction of andere belangrijke beweging of door een gasstroom, of door het instorten van de kern drager.

13. Verlies van DHR functie die kan leiden tot een mogelijke instorting van het primaire circuit structuren moeten nagenoeg worden geëlimineerd.

14. Core natrium-de-vollopen moet praktisch worden geëlimineerd.

Opmerking: dit criterium natuurlijk omvat lekken van de twee reactorvaten.

15. Kern smelten tijdens hantering wordt praktisch geëlimineerd, bijvoorbeeld door passende preventiemiddelen en handelingsfout detectiestelsel.

Geen van deze problemen zijn nieuwe omdat de natrium reageert exotherm met water, en de kern niet in zijn meest reactieve configuratie. Derhalve grote kern transiënten en snelle kritikaliteit is vanaf herconfiguratie of ongewild toevoegen moderator, of voiding het centrale deel van de kern door koken. In feite is lekkage van natrium door kleine gaatjes in de HEX een groot ongemak en moeilijkheden geweest.

Klasse L ([GIF, 2014b](#) , blz. 29):

Gesmolten zout Fast Reactor (MSFR) systemen zijn erkend gunstige kenmerken hebben waardoor ze een potentiële lange termijn alternatief voor vaste brandstoffen fast-neutron-systemen. Echter, het beheersen van de technisch uitdagende technologie vergt gezamenlijke, op lange termijn internationale R & D-inspanningen, te weten:

- systeemontwerp: ontwikkeling van geavanceerde neutronische en thermische-hydraulische koppeling modellen;
- analyse zout interacties met lucht of water bij een ernstig ongeval;
 - analyse van het ongeval's (bijvoorbeeld verlies HEX);
 - fluoriden (Fluoride-zout gekoelde hoge temperatuur Reactor (FHRS)) kunnen grootschalige energieopwekking bieden met behoud van volledige passieve veiligheid.

Deze kwesties zijn eveneens bekend want op stroomuitval of stromen de reactor wordt subkritische als de kern afvoeren en prototypes werden uitgevoerd om de haalbaarheid te demonstreren.

16.7. Meerdere modules en planten risico

Veel AR wordt aangeduid als “modulair” in het ontwerp, waardoor meerdere eenheden massa kan worden geproduceerd met een gemeenschappelijke basis en vergunningen hebben gedeeld aanbrengen. Dergelijke benaderingen worden al met succes gebruikt in het ontwerp en de bouw van industriëleapparatuur en faciliteiten en het verminderen van de bouwtijd van de grote kerncentrales. De AR / SMR bedoeling is om meer te gebruiken, maar kleinere eenheden in staat te stellen:

1. Assemblage-lijn processen met just-in-time levering en minder veldwerk,
- 2.

Laat de initiële investeringen en de productie van een eerdere return on investment,

3.

Kortere engineering en constructie tijden,

4.

Het toevoegen van stappen van macht als de vraag vereist en cash flow toelaat,

5.

Verminderde kosten per eenheid door series te bouwen in plaats van “on-off” of aangepaste ontwerpen,

6.

Upfront one-step beoordeling en licenties (“certificering”) van de gedupliceerde ontwerp,

7.

Het delen van gemeenschappelijke voorzieningen en locatie-infrastructuur,

8.

Reductie van personeel duplicatie voor de veiligheid en operaties,

9.

Lagere kosten van de eenheid downtime en flexibele / gestandaardiseerd onderhoud, en

10.

Verhoogde veiligheid door het systeem diversiteit en minder activiteit vrijlating potentieel.

Deze zijn prima en wenselijke doelen, maar ze bevatten verhoogde specifieke kosten, ten minste voor de eerste paar eenheden die moeten de ontwikkeling, licenties, en de productie-lijn setup dragen. Daarnaast heeft de kwestie besproken van de relatieve veiligheid voor meerdere eenheden die zijn co-located en kunnen interacties tussen systemen en gedeelde faciliteiten te delen. Tot op heden zijn de meeste licenties en bouwt had op basis van een eenheid in een tijd geweest, ondanks de aanwezigheid of co-locatie van andere faciliteiten. Dit werd ook benadrukt door Fukushima, vanwege de aanwezigheid van de verbruikte splijtstof zwembaden op de site, met het potentieel voor bijkomende activiteit release.

Daarom is de ogenschijnlijk simpele veiligheid vraag voor AR is of meerdere, laten we zeggen, 10 kleine eenheden, hebben dezelfde of meer risico dan één eenheid met een aantal veelvoud van het vermogen, laten we zeggen, 10 keer, en een grotere radioactieve en verbruikte splijtstof inventaris per eenheid op dezelfde site?

De overwegingen voor meerdere planten risico zijn al aan de orde voor de gevolgen voor PSA / PRA doeleinden ([CNSC / OECD, 2014](#)). De herzieningen die nodig zijn om de veiligheid van de methoden, evaluaties, regels en voorschriften zijn beschouwd, en een praktische aanpak is met betrekking tot hoe u meerdere eenheden zijn gesuggereerd ([Vecchiarelli et al., 2014](#)). Het algemene doel is gewoon om bescherming te bieden aan het publiek en “praktisch het potentieel voor uitgebreide maatschappelijke ontwrichting te elimineren,” in lijn met de ASME aanpak ([ASME, 2012](#)), en te aggregeren (toe te voegen) het individu CDF te blijven

hieronder enkele overeengekomen algehele website limiet met uitsluiting van enkele laagfrequente gebeurtenissen.

Opgemerkt wordt dat de eenheden delen of op aangrenzende plaatsen gedeeltelijk onafhankelijk en onverwachte interacties kunnen bestaan, zoals blijkt uit Fukushima. Deze veelheid aan mogelijke interacties is ook onderzocht ([Modarres, 2015](#)). Door onderzoek van de uiteenlopende mogelijke interacties, van een eerste verkennende studie werd geconcludeerd dat gemeenschappelijk falen domineerde en waren vanwege systeem gebeurtenis, en menselijke fouten. In feite, gezien de verschillen in het leren fasen en operationele ervaring niveaus, is gebleken dat er meerdere faciliteiten op meerdere plaatsen hebben inderdaad hogere risico's ([Duffey en Saul 2008](#) ;. Bijlage F, p 481). Deze resultaten zijn niet verrassend door zichzelf, omdat gebeurtenissen of schade die meerdere eenheden tegelijk op reageren, of zelfs propageren van eenheid tot eenheid, of de werking van gedeelde systemen of gemeenschappelijk zijn voor het ontwerp nu moeten worden opgenomen in de veiligheidsbeoordeling, in plaats van met een enkele eenheid case als voor alle andere eenheden.

16.8. De rol van de veiligheid van onderzoek en ontwikkeling voor geavanceerde reactoren

Onderzoek en ontwikkeling (R & D) heeft een belangrijke rol in het verstrekken van de methodes, gegevens en geluid beslissingen die nodig zijn voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe technologie. Adequate en uitgebreide tests is van essentieel belang, zij het hardware, software of firmware, voor het bewijs van eventuele nieuwe innovatie of product, om vast te stellen of te weerleggen de veiligheid conclusies, en het systeem prestatie-eisen te ondersteunen.

Het is duidelijk dat niet alles is opgelost voor de formalisering van de veiligheid van de AR's en aanvullende gegevens, analyses, en denken al aan de gang op het moment van de voorbereiding dit hoofdstuk. Een nuttige samenvatting wordt gegeven door de GIF "Roadmap Update" ([GIF, 2014b](#) , blz. 39) voor de systemen die zij nastreven:

Extra R & D op veiligheidskwesties benadrukt door de Fukushima Daiichi ongeval is de bedoeling ... Een primaire focus op de volgende onderwerpen wordt verwacht:

- robuuste en zeer betrouwbare systemen voor adequate koeling van de veiligheid relevante componenten en structuren;
- geometrische stabiliteit van de SFR kern bij een sterke aardbevingen en verzekering van betrouwbare prestaties van de stuurstangen;
- seismisch-resistente ontwerp van de verbruikte splijtstof zwembaden en brandstof Inrichtingen voor het hanteren;
- integriteit van het primaire circuit en het afkoelen;
- ontwerpkenmerken gericht op uitsluiting van het risico van overstroming van het reactorgebouw;

•
effectieve opties voor het omgaan met ernstige ongevallen.

We gaan nu in het oog springende en de belangrijkste veiligheidsprobleem dat is ook het onderwerp van uitgebreid onderzoek. Hoe kunnen natuurlijke circulatie en de inherente en onbepaalde koeling worden aangetoond voor deze schijnbaar vele en gevarieerde AR-systemen?

We verder door het volledig onderzoek naar de stand van de techniek voor de analyse en modellering van natuurlijke circulatie stromen en warmteafvoer, die zo belangrijk zijn voor de effectieve lange termijn afvoer van warmte naar een UIHS in alle AR concepten. Wij specifiek voorkomen analyse warmteafvoer voor aangetaste kernen en de rol van “kernvangers,” die offer en / of gekoeld en versterkte lagen worden toegevoegd onder het RPV. In plaats daarvan rekenen we gewoon op de empirische bewijs van grote en SAS tot op heden (bijv Three Mile Island, Tsjernobyl en Fukushima) die aantonen dat zeer afgebroken en complexe kern configuraties zijn uiteindelijk koelbaar, en dat de primaire veiligheid doel of streven naar AR , niet voor bestaande reactor ontwerpen, is echt een adequate koeling te zorgen voor het begin van beperkte kern schade, kern smelt, en paniek onder de bevolking.

16.9. Natuurlijke-circulatielus en parallelle kanalen thermohydraulica

16.9.1. Invoering

Natuurlijke-circulatielus (NCL) thermohydraulica een essentieel aspect bij het ontwerp, de werking en veiligheid van Gen IV concepten. Sommige concepten vertrouwen op natuurlijkeomloop normale bedrijfsomstandigheden en off-normale veiligheidsvoorschriften. Anderen zijn afhankelijk van natuurlijke circulatie alleen voor passieve off-normale veiligheidsvoorschriften. Het doel van de natuurlijke circulatie passieve veiligheidssystemen is om het systeem in de veilige shut-down staten, voor langere tijd te handhaven, zonder de noodzaak van tussenkomst van een operator of de beschikbaarheid van elektrische stroom.

Passieve veiligheidssystemen op basis van natuurlijke circulatie beogen de ultieme koudebron te bieden bij uitvallen van de normale werking van de koelinstallatie reactorsysteem. Vanwege de cruciale belang, fundamenteel begrip van de eigenschappen en kenmerken van natuurlijke circulatie hydrodynamica, thermische reacties en thermodynamica in de complexe technische apparatuur kernreactor aandrijfsystemen essentieel. Voor de Gen IV-systemen die zijn gebaseerd op natuurlijke circulatie bij normale bedrijfstoestanden de eigenschappen en kenmerken onder steady-state omstandigheden ook goed moet worden verstaan.

Over het algemeen stromen de natuurlijke circulatie aangetroffen in kerncentrales wordt gekoppeld met gesloten lussen bestaan uit leidingen, stromingskanalen van verschillende vormen en verschillende Onderdelen. De lussen worden in het algemeen gesloten, maar een storing in de leiding waaruit de lus kan de natuurlijke circulatie verstoren en maken het systeem onbruikbaar voor het beoogde doel. De secundaire zijde van stoomgeneratoren (SG) voor installaties die natuurlijke omloop normaal bedrijf wordt gekenmerkt als NCL met doorvoer; voedingswater input van de condensor en van dampen in de SG uitgang naar de turbines te voeden. Al deze systemen gebieden waarbinnen de stroming parallel kanalen, zoals splitsstofstaven en brandstof-rod bundels, in de kern, en slangen hebben SG en HEXs.

Natural-circulatie stroomt rond lussen en stroomt in parallelle kanalen zijn beide gevoelig voor afwijkingen van een stabiele werking en excursies in oscillerende en mogelijk instabiele staten. Aldus Gen IV kernreactoren aandrijfsystemen combineren de soort fluïdumstroom en geometrieën waarvan bekend is dat mogelijk leiden tot ongewenste toestanden. In het bijzonder moet ongewenste oscillerende toestanden onder continue werking worden vermeden. Het complete systeem en de bijbehorende operationele begrenzings zijn ontworpen om instabiele staten te vermijden.

De discussie in de volgende paragrafen zal zich richten op de thermische-hydraulische eigenschappen en kenmerken van stromen in de parallelle kanalen en NCLs. De literatuur over algemene aspecten van de analyse, experimentele, mathematische modellen, numerieke oplossingsmethoden en computationele aspecten van deze stromen wordt kort beoordeeld. Deze aspecten bij geassocieerd met specifieke Gen IV systemen zullen ook worden besproken.

16.9.2. Natural-circulatie stromen

De aansturingspotentiaal natuurlijke circulatie-stromen wordt door opwaartse druk in het fluïdum zelf. Dit is in tegenstelling met geforceerde circulatie stromen die worden aangedreven door energie buiten en in het fluïdum, gewoonlijk door middel van een pomp of andere mechanismen. De aansturingspotentiaal natuurlijke circulatie stroomt klein is ten opzichte van die welke externe voedingsbronnen kunnen worden geleverd. Bij steady state de geïnduceerde opwaartse krachten worden gecompenseerd door de drukverliezen rond de lus en bepaalt dit de stationaire massastroom in de NCL. De kleine, intern geïnduceerde rijden potentials maken natuurlijke circulatie stroomt meer vatbaar zijn voor het ontstaan van instabiliteit, omdat verstoringen in het debiet of de stroombron-feed rechtstreeks op veranderingen in de drijvende potentieel. Alle apparatuur deel of gebied van het volledige systeem en de fysische verschijnselen en processen die verband houden met het deel of gebied, het potentieel hebben om verstoringen te introduceren. Bijvoorbeeld, het opstarten van nucleair aangedreven natuurlijke-circulatie-installaties, of veranderingen in de stabiele toestand, zijn verstoringen die zullen optreden tijdens de levensduur van het systeem.

Een ruwe werkdefinitie instabiliteit kan worden geformuleerd als een afwijking van de bedoelde koers van van een thermo-hydrodynamische systeem. Waargenomen afwijkingen omvatten aanhoudende periodieke oscillaties; gedempte trillingen die weer soepel draait groeiende trillingen in systemen die kracht kan injecteren in het fluïdum; en aperiodisch, chaotisch, en trillingen. [Nayak en Vijayan \(2008\)](#) geven aan dat zelfs bij steady-state omstandigheden, oscillaties in natuurlijke-circulatiesystemen, waaronder koken tweefasige systemen zijn algemeen aanwezig. Amplitudes groter dan $\pm 10\%$ van de gemiddelde toestand worden soms geclassificeerd als instabiliteiten. Anderen zijn van mening dat de amplitudes groter zijn dan $\pm 30\%$ aan te geven instabiliteit. In complexe systemen ontworpen apparatuur effecten van interacties tussen de fysische verschijnselen en processen die optreden in de verschillende componenten kan moeilijk te kwantificeren. De chaotische reactie van deterministische wiskundige modellen zoals ontdekt door [Lorenz \(1963\)](#) is nauw verwant aan geïdealiseerde modellen van stroming en warmteoverdracht in natuurlijke circulatie systemen.

[Ruspini et al. \(2014\)](#) en [Ruspini \(2013\)](#) heeft uitvoerige beschrijvingen van de fysische verschijnselen en processen geassocieerd met elk van de verschillende

soorten instabiliteit gegeven. Het volgende is genomen, met toestemming (met een lichte wijziging in de weergave van een paar van de woorden), uit de inhoudsopgave van zijn proefschrift ([Ruspini 2013](#)), *Two-Phase Flow Instabiliteit Mechanisms* .

Kenmerkende drukval versus debiet instabiliteiten

Ledinegg instabiliteit

Stroomverdeling instabiliteit

Stromingspatroon transitie

Pressure Drop Oscillation (BOB)

Density Wave Trillingen (DWO)

Type I: Als gevolg van de zwaartekracht, DWO _I

Type II: Als gevolg van wrijving, DWO _{II}

Type III: Als gevolg van momentum, DWO _{III}

Verbinding dichtheid golfverschijnselen

Dichtheidsgolf oscillatie in parallelle kanalen

Gekoppeld neutronische thermo-hydraulische instabiliteiten

Knipperende instabiliteit (FSH)

Thermische Trillingen (THO)

GEySering (GES)

Natural Boiling Oscillation (NBO)

Thermo-akoestische oscillaties (TAO)

Instabiliteiten in Condenserende stromen

Zelf aanhoudende oscillaties

Kenmerkende drukval versus stroomsnelheidcurve voor condensatiesystemen

Oscillaties in evenwijdige kanalen condenserend

Waterslag verschijnselen

Stromingsgeïnduceerde instabiliteiten

Deze lange lijst is een indicatie van de mogelijke complicaties die moeten worden beschouwd voor de natuurlijke circulatie systemen. Uitgebreide discussies, met inbegrip van experimentele waarnemingen, voor elk van deze worden behandeld in de tekst en de bijbehorende documenten door [Ruspini et al., 2010](#) ; [Ruspini et al., 2011a.](#) ; [Ruspini et al., 2011b.](#) ; [Ruspini et al., 2012.](#) ; [Ruspini et al., 2014.](#) ; [Ruspini 2012](#) . [IAEA \(2005\)](#) hebben een aantal van deze samengevat, zoals weergegeven in [tabel 16.3](#) .

Tabel 16.3.

Indeling thermische-hydraulische instabiliteiten

Klasse	Type	Mechanisme	kenmerkend
statische instabiliteiten			
Fundamentele (of pure) statische instabiliteiten	Flow excursie of Ledinegg instabiliteiten		Stroom ondergaat plotselinge, grote amplitude excursie naar een nieuwe,

Klasse	Type	Mechanisme	kenmerk
			stabiele bedrijfstoestand
	kokend crisis	Ondoeltreffende verwijdering van warmte van heet oppervlak	Wandtemperatuur excursie en stroom oscillatie
Fundamentele ontspanning instabiliteit	Stromingspatroon overgang instabiliteit	Bruisend stroming minder void maar hoger ΔP dan die ringvormige stroming	Cyclisch stromingspatroon overgangen en stroomsnelheid variates
Compound ontspanning instabiliteit	Bumping, geysering of chugging	Periodieke aanpassing van metastabiele staat, meestal te wijten aan een gebrek aan kernvormingsplaatsen	Periode proces van oververhitting en gewelddadige verdamping met mogelijke uitzetting en hervullen
Dynamic instabiliteiten			
Fundamentele (of pure) dynamische instabiliteiten	akoestische oscillaties	Resonantie van drukgolven	Hoge frequenties (10-100 Hz) gerelateerd aan de tijd die nodig is voor propagatie in druk golf systeem
	Dichtheidsgolf oscillaties	Vertraging en feedbackeffecten in verband tussen debiet, dichtheid en drukval	Lage frequentie (1 Hz) met betrekking tot looptijd van continuïteit golf
Compound dynamische instabiliteiten	Thermal oscillaties	Wisselwerking van variabele warmte- overdrachtscoëfficiënt van stroomdynamica	Komt in filmboiling
	Kokend water reactor instabiliteit	Interactie van void- reactiviteit koppeling met stromingdynamica en warmteoverdracht	Sterke alleen voor kleine brandstof tijd constant en onder lage druk
	Parallelkanaal instabiliteit	Interactie tussen klein aantal parallelle kanalen	Verschillende manieren van stroom herverdeling
Verbinding dynamische instabiliteit nevenverschijnselen	Drukval oscillaties	Stroom excursie initieert dynamische interactie tussen kanaal en samendrukbare volume	Zeer-lage-frequentie periodiek proces (0,1 Hz)

Gebruikt met toestemming van de IAEA, 2005. natuurlijke circulatie in watergekoelde
Kerncentrales Phenomena, Models, en methodologie voor de betrouwbaarheid van het
systeem Assessments, IAEA-TECDOC-1474. IAEA, Wenen, p. 23.

[tabelopties](#)

Tal van factoren zijn bepaald om de prestaties, en vooral de stabiliteit van NCLs beïnvloeden. Veel van deze werden geteld in de eerste onderzoeken van de stroming en warmteoverdracht in NCLs. Anderen hebben voorgedaan als de originele idealisaties, zowel analytisch en experimenteel, zijn gegeneraliseerd om extra en realistische aspecten van het fysieke domein bevatten. Sommige van deze factoren omvatten, onder andere

1.

De mate van onderkoeling van de vloeistof in het kanaal ingang,

2. De drukgradiënt in de onderkoelde-vloeibare deel van een kokende kanaal,
3. De verdeling van de drukverliezen rond het stromingskanaal
4. De operationele drukniveau
5. De warmteflux / kanaals het fluïdum,
6. Het gehalte lege ruimten / kwaliteit en de verdeling en het tweefasige stromingsregime
7. De massastroomsnelheid van het fluïdum,
8. Geometrische eigenschappen van de stromingskanalen in het systeem,
9. De operationele drukniveau met grotere gebieden van stabiliteit bij verhoogde druk en
10. De thermodynamische toestand van het koelmiddel; één of twee fasen en de verdeling ervan.

Deze lijst beschrijft wat kan worden gekenmerkt als een min of meer zuivere thermisch aangedreven hydrodynamische NCL dat de effecten van technisch materiaal en het bijbehorende fysische verschijnselen en processen niet vermeld. Sommige van deze factoren omvatten vermogenopwekkingsbrandstof in splijtstofstaven, warmtegeleiding in alle vaste materiaal grenzen van het fluïdum, veranderingen in flow-kanaalgeometrie rond de lus systeem-state change verstoringen die tijdens normaal bedrijf, veranderingen in grens condities (BCS) en werking van apparatuur die is gekoppeld aan het fluïdum. De lijst bevat er evenmin rekening bekende problemen met betrekking tot numerieke oplossing toegepast op de wiskundige modellen van NCLs, eenvoudige en realistisch, en het begin van stromingsinstabiliteit (OFI) bij enkele en parallelle kanalen.

Hoewel enkelfasige stroomsystemen een focus van onderzoeken OFI, vooral onder natuurlijke circulatie omstandigheden tweefasige stroomsystemen zijn, inherent complex, hebben meer aandacht gekregen. Interesse in kokend twee fasen natuurlijke circulatie systemen voor power toepassingen nucleaire was aanwezig op de vroege stadia van R & D van de systemen. In het algemeen werden deze vroege ontwikkelingen gedreven door de duidelijke voordelen van een natuurlijke circulatie systemen voor nucleaire onderzeeërs.

Drukverlies verdelingen rond de lus is bekend dat eerste-orde effecten ten opzichte stabiliteitseigenschappen en kenmerken onder natuurlijke circulatie omstandigheden. De locaties van enkelvoudige, omkeerbare en onomkeerbare veranderingen en verliezen druk, respectievelijk geassocieerd met geometrische wijzigingen zijn bepaald belangrijk. Lokale verliezen bij de in- en uitgangen van de energievoorziening of de Exchange-onderdelen is aangetoond dat met name van

belang te zijn. Drukverliezen bij de ingang zijn van cruciaal belang met betrekking tot het bevorderen van stabiliteit, en die bij een uitgang in mindere mate. Grote verliezen bij een uitgang kan instabiliteit veroorzaken. De omkeerbare drukveranderingen geassocieerd met continue of abrupte veranderingen in de stroom-kanaalgeometrie, zoals mondstukken en schoorstenen en abrupte expansies of samentrekkingen, zijn van belang. Wall-to-fluidumwrijving, een gedistribueerde weerstand tegen vloeistofbeweging, en de verdeling langs het stromingskanaal is ook belangrijk.

Fysische instabiliteiten ontstaan wanneer discontinuïteiten en / of nadelige gradiënten aanwezig in een stromingsveld zijn. Klassieke situaties die grondig zijn onderzocht omvatten discontinuïteiten in snelheid, temperatuur, druk en dichtheid of combinaties daarvan. Bij mathematische modellering van NCLs, discontinuïteiten geïntroduceerd in algebraïsche representaties van model sluitingen voor wand; interfase, wrijving, warmte en massaoverdracht; en de toestandsvergelijking (EoS) kunnen instabiliteiten te introduceren. Dit zijn puur artefacten van wiskundige constructies en zijn niet aangetroffen in het fysieke domein. Het stopcriterium voor numerieke iteratieve methoden moeten worden gecontroleerd of de berekende resultaten onafhankelijk van zijn waarde.

Representatie van de wand-wrijvingsfactor correlatie in de overgang tussen laminaire en turbulente wrijving, bijvoorbeeld, is aangetoond dat het potentieel om kunstmatige instabiliteit introduceren ([Ambrosini et al., 2004](#) , voor een voorbeeld). Op hetzelfde moment, in het fysieke domein overgang tussen laminaire en turbulente stroming als gevolg van variaties in het fluïdum thermodynamische toestanden rond een lus instabiliteit introduceren. Dergelijke veranderingen kunnen het gevolg zijn van de afhankelijkheid van de vloeistofviscositeit van de temperatuur, bijvoorbeeld, of veranderingen in het stroomgebied rond de lus. Koken en condenseren tweefasenstromingen bijzonder belangrijke voorbeelden van belangrijke veranderingen in de thermodynamische toestand. Eveneens vloeistoffen die werken bij superkritische thermodynamische staten, het ontvangen van een hernieuwde belangstelling voor de nucleaire reactor ontwerpen, van betekenis ervaren toestand verandert rond een NCL.

16.10. Boekbeoordeling

In de volgende paragrafen een korte samenvatting van enkele van de literatuur in verband met thermische-hydraulische eigenschappen en kenmerken en prestaties, waaronder intrede van instabiliteit, in NCLs en evenwijdige kanalen wordt gegeven. In het algemeen is de literatuur over NCLs en bijbehorende fysische verschijnselen en processen is veel te groot in detail worden beoordeeld hier. In plaats daarvan veel van de reviews al, en vooral de laatste, gegeven zal worden vermeld, samen met enkele van de eerdere literatuur in verband met kernenergie systemen.

Verschillende beoordelingen van de vele aspecten van enkel- en tweefasenstromingen, met inbegrip van stromingen in NCLs en parallelle kanalen, zijn onlangs verschenen als volgt. [Ruspini et al. \(2014\)](#) , gebaseerd op Ruspini's proefschrift ([Ruspini, 2013](#)), hebben een uitgebreide beoordeling gegeven, onder vermelding van meer dan 200 literatuur bronnen. [Ruspini \(2013\)](#) heeft bovendien onderzocht wiskundige modellen en numerieke oplossingsmethoden, waaronder foutschattingen, voor aanbrenging op diverse experimentele en analytische gegevens. Aanverwante onderzoeken ontwikkeld in de loop van zijn onderzoek

worden gerapporteerd in [Ruspini et al., 2010](#) ; [Ruspini et al, 2011a.](#) ; [Ruspini et al, 2011b.](#) ; [Ruspini et al, 2012.](#) ; [Ruspini 2012](#) .

[Basu et al. \(2014\)](#) hebben toepassingen van single-fase NCLs om de macht toepassingen nucleaire beoordeeld, en [Misale \(2014\)](#) presenteerde een overzicht van de status van single-fase NCLs. [Sarkar et al. \(2014\)](#) geven een overzicht van superkritische NCLs. Eerdere beoordelingen dat deze extra vergoeding zijn [Prasad et al., 2007](#) ; [Nayak en Vijayan 2008](#) en [Vijayan en Nayak \(2010\)](#) , die instabiliteiten beoordeeld voor het koken in twee fasen NCLs, met inbegrip van natuurlijke circulatie kokend water reactoren (BWR). De laatste referentie heeft een lijst van instabiliteit die zich hebben voorgedaan om apparaten te bedienen.

[Manavela Chiapero et al, 2012.](#) ; [Manavela Chiapero et al, 2013a.](#) ; [Manavela Chiapero et al., 2013b](#)) hebben drukval oscillaties in kokend systemen beoordeeld. Het uitputtende karakter van het onderzoek aan de Noorse Universiteit voor Wetenschap en Technologie kan niet genoeg benadrukt worden. Beoordelingen van instabiliteiten bij enkele en evenwijdige kanalen omvatten [Ozawa et al., 1989](#) ; [Tadrist 2007](#) en [Kakac en Bon \(2008\)](#) . Dit laatste is vooral voltooid. [Maart-Leuba en Rey \(1993\)](#) presenteerde een state-of-the-art review bij gekoppelde thermo-hydraulische neutronische instabiliteiten in BWR.

De IAEA hebben verstrekt rapporten over zowel de algemene begrippen en een aantal gerichte aspecten van Gen IV kernreactoren ([IAEA, 2001](#) , [IAEA, 2002](#) , [IAEA, 2004](#) , [IAEA, 2005](#) , [IAEA, 2009](#) , [IAEA, 2012](#) , [IAEA, 2014](#)). [Saha et al. \(2013\)](#) geven een overzicht van de algemene concepten van Gen IV machines en de thermohydraulica R & D die nodig zullen zijn voor het ontwikkelen en valideren meergefasige, multiscale, multiphysics geavanceerde computationele modellen en methoden. [Rowinski et al. \(2015\)](#) verschaft een overzicht van de verschillende implementaties van SMR concepten.

Aanvullende literatuur reviews die over het algemeen ouder zijn die genoemd zal worden opgemerkt in de volgende discussies. De discussies in dit rapport zal zich meer richten op de nucleaire reactor toepassingen in plaats van het algemene geval van parallelle kanalen en NCLs. Echter, beide situaties ontstaan aan de macht toepassingen kernenergie. De algemene gevallen zijn uitvoerig onder de literatuur zojuist geciteerde.

16.10.1. De vroege onderzoeken

Het concept van het gebruik van natuurlijke circulatie in de productie van energie systemen nucleair aangedreven dateert uit de vroegste dagen, de vroege jaren 1950, van de toepassingen van kernenergie. De kwestie van de hydrodynamische stabiliteit van NCLs werd eerst onderzocht, analytisch en experimenteel in deze vroege periode. Representatieve publicaties omvatten [Hamilton et al, 1954.](#) ; [Wissler et al, 1956a.](#) ; [.Wissler et al, 1956b](#) , [Chilton, 1957](#) ; [Lowdermilk et al, 1958.](#) ; [Garlid et al, 1961.](#) ; [Anderson et al, 1962.](#) ; [Lottes et al., 1963](#) en [Jain \(1965\)](#) , onder vele anderen. Een elektronisch literatuuronderzoek zullen veel citaten vroeg publicaties te produceren uit de jaren 1950 die moeilijk te verkrijgen zijn. In de Verenigde Staten was dit onderzoek aan de gang in een paar nationale laboratoria, universiteiten en private organisaties. Deze laatste werden in het algemeen ondersteund door middel van contracten met de overheid. Een deel van het werk is gericht op toepassingen voor nucleair aangedreven marineschepen.

[Creveling en Schoenhals \(1966\)](#) , [Keller \(1967\)](#) , en [Welander \(1967\)](#) verricht fundamenteel werk op zeer geïdealiseerde systemen. Deze documenten worden beschouwd als landmark de eerste studies en verder worden aangehaald aan deze

dag. Merk echter op dat experimenteel en analytisch onderzoek aan de gang was geweest voor meer dan een decennium, toen de kranten werden gepubliceerd. Het rapport van [Garlid et al. \(1961\)](#) heeft uitgebreide citaties van de oude literatuur waaronder analytische en experimentele onderzoeken. Het rapport bevat ook een analoge computer programma voor het model vergelijkingen. [Alstad et al. \(1956\)](#) onderzochten eenfasige NCLs en [Wissler et al, 1956a.](#) ; [Wissler et al, 1956b.](#) ; [Anderson et al, 1962.](#) ; [Jeglic en Grace, 1965](#) ; [Gratie en Krejsa 1967](#) en [Yadigaroglu en Bergles \(1969\)](#) onderzochten tweefasige lussen. Het begrip SCWR basis van natuurlijke circulatie werd ook onderzocht in 1960 (zie [Harden, 1963](#) , [Cornelius, 1965a](#) , [Cornelius, 1965b](#) , voor voorbeelden). De hernieuwde belangstelling in superkritisch reactoren is onlangs gedreven aanzienlijke extra onderzoek.

Het vroege werk in de Verenigde Staten werd gericht op de verschillende modellen van de BWR vervolgens onder experimentele en analytisch onderzoek. Deze werkt met een machine onder de experimentele kokend water reactor (EBWR), Special Power Excursion Reactor Test Program (Spert), Spert-I, en het kokende water reactor experiment (BORAX) en BORAX I-V machines ([Lottes et al., 1963](#)). Stabiliteit kokend tweefasen stroming en warmteoverdracht, OFI en kritische warmtestroom of vertrek van kiemkoken werden alle onderzocht. [Berenson \(1964\)](#) heeft een samenvatting van de experimentele resultaten tot op dat moment. In het algemeen de stabiliteit van BWR tijdens verschillende fasen van de vlucht een actief gebied van onderzoek. Alle bevindingen tot nu toe te geven dat inbedrijfstelling en werking van kernenergie aangedreven natuurlijke circulatie systemen gemakkelijk wordt bereikt.

De meeste vroege onderzoek werden gekoppeld experimentele en analytische inspanning, en dat de koppeling blijft op heden. Analytische benaderingen waren enigszins eenvoudig, omdat de wiskunde leidt tot handelbare probleemstellingen voor een eenvoudige NCLs. Bevindingen uit de vroege analytische onderzoeken aangegeven dat aandacht moet worden besteed aan discretisatie en numerieke oplossing van modelvergelijkingen bij toepassing op onderzoeken van het intreden van instabiliteit. Op dit moment in het begin van de 21e eeuw, toepassingen van multidimensionale computational fluid dynamics (CFD) blijkt te zijn nuttig in graining dieper inzicht in de fysische verschijnselen en processen die kunnen leiden tot het ontstaan van instabiliteit zijn. CFD blijkt ook nuttig om tekortkomingen in de klassieke nul- en één-dimensionale analytische modellering van NCLs.

De eerste experimentele gegevens en bijbehorende analyses toonden dat oscillerend gedrag, hoewel aanwezig, niet altijd tot groei divergentie. Gesloten gebieden van instabiliteit, begrensd door zowel lagere als hogere macht toevoegingen in de systemen werden waargenomen. De grenzen en het bereik van de gesloten gebieden gevarieerd met de werkdruk niveau en de thermodynamische toestand van het fluïdum. De diameter en lengte van de leidingen in de eenvoudige experimentele systemen, en andere geometrische gegevens, bleken ook de stabiliteitseigenschappen van het systeem beïnvloeden.

Het begin van instabiliteit in NCLs nauw gecorreleerd met significante verschillen tussen de gradiënten in aansturingspotentiaal en de stromingsweerstand rond de lus. Hierbij de aanvang exact analoog aan het begin van instabiliteiten bij stromen in enkelvoudige en parallelle kanalen. De belangrijke effecten van de grootten van de stromingsweerstand in het inkomende en uitgaande poten van de lussen aan de energievoorziening werden ook genoteerd. Verhogingen van de weerstand aan de inkomende kant vergroot de grootte van het gebied van stabiliteit, terwijl het

omgekeerde gevonden voor de uitgaande zijde. Verhogen van de lokale stromingsweerstand aan de inlaatzijde steeds een gemeenschappelijke methode voor aanvang van instabiliteit te voorkomen. Tegelijkertijd is het effect van de weerstand op het vermogen van het systeem moet worden beschouwd.

De meeste van de oorspronkelijke en vroege experimentele en analytische onderzoeken met enkelvoudige geïdealiseerde experimentele loops en één-dimensionale formuleringen van de modelvergelijkingen. Zelfs in deze vroege fase van het onderzoek, alle van de citaten eerder vermeld gebruikt wiskundige modellen als een middel om dieper inzicht te krijgen. One-dimensionale, -area gemiddeld wiskundige modellen van de regerende vergelijkingen over het algemeen viel samen met het niveau van de metingen in experimentele faciliteiten. Bovendien, de vroegste onderzoeken min of meer overgeslagen overwegingen bijna alle aspecten van lussen in het fysieke domein: ongelijkmatige stroming kanaalgeometrie, latentie geassocieerd met energieoverdracht en transportprocessen zoals geleiding in al het vaste materiaal rond het fluïdum en veranderingen in de toestand van BCs die zich voordoen in HEXs, onder anderen. Het effect van neutronen-vervoer en energieproductie en holte-vermogenskoppeling in de kern van kernreactoren een focus.

Analytische onderzoek in de frequentie-domein, op basis van linearisatie van het model vergelijkingen zijn nuttig voor natuurlijke circulatie systemen. In het algemeen, de modelvergelijking systeem groeit tot ze extra fysische verschijnselen en processen en meer details bij engineered systemen uitrusting, het lineaire systeem krijgt te complex uitvoering voltooid. Op dit punt lineaire systemen en numerieke oplossing, inclusief numerieke inversie van Laplace getransformeerde systemen worden opgenomen in computersoftware. Frequentiedomein modellen en codes verder worden gebruikt voor real-world-systemen. Echter, de ultieme onderzoeken en kwantificering in het algemeen op basis van simulaties in de tijd domein. Een groot deel van de beschikbare experimentele data zijn gebruikt om tijd-domein modellen en methoden te valideren en goedkeuring voor toepassingen van deze veiligheidskwesties te krijgen.

Trimjackets in de eerdere mathematische modellen gebruikt (1) specificaties van de energievoorziening in het systeem en gelijke energie afwijzing of (2) eigenschap van de temperatuur bij de energiebron en wastafel. Deze benadering verwaarloost de temporele reactie van de energie-overdracht processen van de BCS van een ultieme bron en de BCS van de ultieme gootsteen. Voor toepassingen Gen IV productie van kernenergie de gemanipuleerde apparatuur dat maakt de bron en wastafel en de processen die zich voordoen in die apparatuur moeten worden opgenomen in een analyse en prototypische experimentele faciliteiten.

[Rao et al, 2005a.](#) ; [Rao et al, 2005b.](#) ; [Rao et al, 2005c.](#) ; [Rao et al, 2005d.](#) ; [Rao et al., 2008](#) en [Kumar en Gopal \(2009\)](#) hebben de wiskundige modellen gegeneraliseerd naar meer bijna realistischer BCs omvatten door te overwegen HEXs voor de energiebron en wastafel. Aanvullende veralgemening kan worden verkregen door toepassing van meer gedetailleerde modellering van de fysische verschijnselen en processen die plaatsvinden binnende HEXs en het fluïdum toestanden bij de ingangen daarvan (bijvoorbeeld stroomsnelheid en thermodynamische toestand verstoringen).

Fundamentele analytisch en experimenteel werk bleef gedurende de jaren 1950 tot de jaren 1970. Diverse kwesties in verband met BWR, waaronder de stabiliteit en het

begin van instabiliteit en de gevolgen van neutronische macht feedback, waren primaire aandachtsgebieden. BWR werden beschouwd in de oude literatuur, vooral met betrekking tot de EBWR, Spert I en de variaties van de BORAX I-V ([Berenson et al, 1964](#) , [Levy Beckjord, 1960](#)). De BORAX het bedienen van machines werden gebouwd bij de Nationale Reactor Testing Station in de buurt van Idaho Falls, Idaho te beginnen in de zeer vroege jaren 1950. Boiling, stabiliteit en neutronen hebben een zeer lange geschiedenis ([Haroldsen 2008](#)). Deze experimenten waren de eersten die leegte-reactiviteit koppeling en feedback te onderzoeken. De resultaten van geysering instabiliteiten kon worden waargenomen uit een nabijgelegen openbaar vervoer rijbaan.

Experimenteel en analytisch werk werd ook gewerkt in Europa AB Atomicenergi geassocieerd met de Marviken en Halden kokend zwaarwaterreactor machines ([Becker et al, 1963](#) , [Becker et al, 1964](#)) en in Italië Centro Informazioni, Studi ed Esperienze (CISE). De AB Atomenergi werk omvatte uitgebreide experimentele faciliteiten en wiskundige modellering. In sommige opzichten deze inspanningen bevestigd, en aanzienlijk aangevuld met de bevindingen van het eerdere werk van de jaren 1950.

Op dat moment was vastgesteld dat (1) wanneer de druk verhoogt het vermogen aan het begin van instabiliteit toeneemt en de frequentie van oscillaties verhogen; (2) het begin van instabiliteit af naarmate de inlaat tussenkoeling toe, zodat lagere waarden de voorkeur ten opzichte zorgen voor stabiele toestanden; (3) als de lokale drukverlies bij de inlaat van de energievoorziening toeneemt, regio stabiele werking wordt verhoogd; en (4) als de lokale drukverlies bij de uitlaat toeneemt, regio stabiele werking afneemt. In het laatste geval lusstroming minder stabiel.

Overzicht van de literatuur werd gegeven door [Boure et al. \(1973\)](#) , waarin de fysieke mechanismen en wiskundige modellen in gebruik tot op dat moment worden besproken. Het rapport bevat een overzicht van de computer codes die aan het probleem had toegepast in de frequentie en tijd domeinen. [Saha, 1974](#) ; [Ishii, 1976](#) ; [Saha et al., 1976](#) en [Saha en Zuber \(1978\)](#) verschaft een eerste onderzoek naar de effecten van thermische niet-evenwicht tussen de vloeistof en dampfase. [Lahey en Drew \(1980\)](#) besproken instabiliteit problemen geassocieerd met LWRs.

16.10.2. Three Mile Island kwesties

Na het incident in het Three Mile Island kerncentrale in 1979, de nucleaire industrie in zijn geheel over de hele wereld geïntensiveerd experimenteel en analytisch onderzoek naar alle aspecten van de natuurlijke circulatie thermohydraulica. De kleine-break verlies van koelvloeistof ongeval (SBLOCA) aard van het incident bleek het cruciale belang van natuurlijke circulatie tot het begrijpen van de reactie van zulke systemen onder deze omstandigheden. De hele industrie gewerkt om dat begrip van alle aspecten SBLOCAs, voor bestaande en toekomstige systemen, was juist en volledig te garanderen.

Major experimentele programma werden bedacht, ontwikkeld, gebouwd en met succes afgerond, waaronder LOBI-MOD2, SPES, ROSA-III, ROSA-IV LSTF, Betsy, en FIST. Experimentele faciliteiten oorspronkelijk gebouwd voor grote-break verlies vankoelvloeistof accident (LBLOCA) onderzoeken (bijv Semiscale en LOFT) werden gewijzigd om te kijken naar de zaak SBLOCA. De gegevens van deze faciliteiten gebruikt blijven worden als validatie oefeningen voor wiskundige modellen en computercodes. [Aksan \(2008\)](#) is een overzicht van activiteiten in verband met

SBLOCA en belangrijk systeem analyse codes zoals TRACE (gegeven [US NRC, 2008](#)), TRAC-P ([LANL, 1986](#)), TRAC-B ([Spore et al, 1981](#) ; [INEL, 1992](#)), RELAP5 ([INEL, 1995](#) , [ISL, 2001](#)), CATHARE ([Bazin en Pelissier, 2006](#)), en ATHLET ([Austregesilo et al., 2006](#) ; [Lerchel en Austregesilo, 2006](#)). Interesse in Gen IV machines heeft de ontwikkeling van andere modellen en codes gereden. [Zvirin \(1982\)](#) beoordeeld experimentele gegevens en analytische benaderingen geschikt voor circulatie en SBLOCA, met bijzondere aandacht voor drukwaterreactoren. De resultaten van andere onderzoeken onder leiding van het Electric Power Research Institute onder [Zvirin, 1979](#) ; [Zvirin, 1985](#) ; [Zvirin et al., 1981](#) ; [Duffey en Sursock, 1987](#) ; [Greif et al., 1979](#) ; [Mertol et al., 1981](#), en [Mertol \(1980\)](#) onder anderen. [Greif \(1988\)](#) presenteerde een literatuurstudie en samenvatting om die tijd. [Gruszynski en Viskanta \(1983\)](#) uitgevoerd en experimenteel onderzoek van een rechthoekige NCL behulp pijpenbundels de energiebron en wastafel. Zij melden dat de wrijving factor correlatie voor natuurlijke circulatie stromen is anders dan die voor geforceerde circulatie. De jaren 1980 en verder te gaan, zag een steeds toenemend aantal publicaties aanpakken van experimentele, analytische, numerieke en system-code toepassingen NCLs. Het uitgebreide citaten in de recente beoordelingen eerder vermeld kan worden gebruikt voor de follow-up op een aspecten van NCLs en parallelle kanalen. De meest recente activiteiten zijn gedreven door de voorgestelde toepassingen Gen IV, en daarbuiten, kernreactoren.

16.10.3. Kokend water reactor stabiliteit in de tijd en frequentiedomeinen

Hernieuwde focus op instabiliteiten in werking BWR systemen, met name het effect van neutronica, vermogensreductieregeling en patronen van oscillerende stroming in parallelle kanalen, die zijn opgesloten splijtstofstaaf reeksen in deze systemen. Uitgebreide inspanning werd toegepast op modellen en analyses op het frequentiedomein en een aantal computer-codes werden bedacht, ontwikkeld en toegepast ([Peng et al., 1984](#) ; [Peng et al., 1986](#) ; [Lahey et al., 1990](#) ; [March-Leuba 1984](#) ; [maart-Leuba en Rey, 1993](#)). Diverse frequentiedomein analyse methoden zijn ook ontwikkeld, waaronder LAPUR ([Escriva et al., 2008](#)) en NUFREQ-NP ([Peng et al., 1984](#)), onder anderen.

De wiskundige modellen en numerieke oplossing methoden die worden gebruikt in de grote systemen-analyse computer codes gebruikt in de industrie waren de onderwerpen van het onderzoek met betrekking tot toepassingen SBLOCA en natuurlijke circulatie. Gedurende deze periode van intensief onderzoek, het cruciale belang van de discretisatie van de continue vergelijkingen en de bijbehorende numerieke oplossingsmethoden gebruikt in systemen analysecomputer-codes voor niet-lineaire analyse in het tijddomein is een gebied van primaire focus.

Sommige van deze codes bevatten RETRAN ([Computer Simulation & Analyse, 1998](#)), RELAP5 ([Information Systems Laboratories, 2001](#)), TRAC-BWR ([Spore et al., 1981](#)), CATHENA ([Richards et al., 1985](#)), CATHARE ([Bazin en Pelissier, 2006](#)), ATHLET ([Austregesilo et al., 2006](#) ; [Lerchel en Austregesilo 2006](#)), en RAMONA([Rohatgi et al., 1998](#)), samen met variaties hiervan als ze worden ontwikkeld voor nieuwe toepassingen. In aanvulling op de voortdurende actualisering van deze belangrijke codes om de toepasbaarheid te krijgen tot nieuwe analyses, modellen, methoden en code ontwikkeling gaat over de hele wereld. Zo heeft Korea de TASS / SMR code ontwikkeld ([Hwang et al., 2005](#) ; [. Hwang et al, 2006](#)), onder anderen. Naast deze belangrijke codes zijn andere tijd- en frequentiedomein

modellen en werkwijzen ontwikkeld voor lokale, speciale analyses van experimentele gegevens en numerieke oplossingsmethoden. Deze special-purpose modellen en methoden zijn over het algemeen niet vrij beschikbaar.

Low-flow stabiliteit, uitgevoerd bij de Peach Bottom kerncentrale in de Verenigde Staten ([Woffinden en Niemi, 1981](#)) zijn gebruikt voor de validatie van het systeem-analyse modellen, codes, en aanvraagprocedures. [Costa et al. \(2008\)](#) paste de gekoppelde RELAP5 / MOD3.3 thermische-hydraulische code en PARCS-2,4 driedimensionale neutronica code om deze tests simuleren. [D'Auria \(1997\)](#) trok samen van de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling state-of-the-art rapport. [Mori \(1998\)](#) gebruikten de RETRAN 3D ([CSA 1998](#)) -code en [Wulff et al. \(1992\)](#) en [Rohatgi et al. \(1994\)](#) paste de Brookhaven National Laboratory engineering Plant Analyzer aanpak. [Costa et al. \(2008\)](#) samengevatte andere gebeurtenissen die zijn opgetreden bij werkende fabrieken. Deze gegevens worden ook gebruikt voor validatie.

[Aguirre et al. \(2005\)](#) presenteerde een uitgebreide samenvatting van de analytische, experimenteel, en het model en code validatie van onderzoek ter ondersteuning van het verkrijgen van diep inzicht in de natuurlijke circulatie en stabiliteit kwesties voor BWR. Vier grote experimentele faciliteiten-Clotaire ([Gouirand, 1988](#)), DESIRE ([van de Graaf et al., 1994](#)), CIRCUS ([de Kruijf et al., 2000](#)), en PANDA ([Dreier et al., 1996](#)) -en zeven grote systeem -analyse modellen en codes-MONA ([Hoyer, 1994](#)), ATHLET ([Krepper en Prasser 1999](#)), RAMONA ([Grandi et al., 1998](#)), LAPUR ([Otaduy en maart-Leuba, 1990](#)), FLICA ([Toumi et al., 2000](#)), RELAP5 / MOD3 ([INEL, 1995](#)), en TRAC-BF1 / MOD1 ([INEL 1992](#) -Heb) is toegepast op het probleem. CFD codes werden gebruikt voor specifieke problemen, en een lineaire stabiliteit model en code ontwikkeld binnen het project. [Kozmenkov et al. \(2012\)](#) hebben CIRCUS gegevens die worden gebruikt voor de validatie van de RELAP5 modellen en code.

Onderzoek naar verschillende aspecten van stabiliteitsproblemen in BWR, in het bijzonder natuurlijke circulatie BWR, blijven de huidige tijd. Docenten en medewerkers van de TU Delft, waarschijnlijk als gevolg van de aanwezigheid van de operationele Dodewaard machine, hebben verschillende aspecten van de BWR stabiliteit (onderzocht [Furuya 2006](#) , [Marcel 2007](#) , [Stekelenburg, 1994](#) ; [van Bragt, 1998](#)). [Van der Hagen et al. \(2000\)](#) hebben informatie over BWR stabiliteit experimenten beoordeeld. Activiteiten zijn na de state-of-the-art herziening ([Hu, 2010](#) ; [Hu en Kazimi 2011](#) ; [Hu en Kazimi 2012](#) ; [Xu et al., 2009](#) ; [Lakshmanan en Pandey, 2009](#) ; [. Rohde et al, 2010](#)) , onder andere.

16.10.4. Numerieke methoden en artefacten

Bijna alle numerieke methoden impliciet invoeren artefacten in numerieke oplossingen toegepast op de afzonderlijke benaderingen aan de continue modelvergelijkingen. Deze artefacten significante invloed op de dispersie en dissipatie van de berekende reactie, om zo voor fouten in de berekende verhouding verval. Omdat onderzoek naar de stabiliteitnatuurlijke circulatie stroomt een primaire doelstelling van de analyses, moet worden aangetoond dat de numerieke methode zelf kunstmatige instabiliteit of kunstmatige stabiliteit niet invoeren. Impliciete numerieke oplossingsmethoden ontwikkeld zodat grotere waarden van de discrete tijdstap worden gebruikt, speciaal kunstmatige stabiliteit introduceren in berekeningen. Aldus numerieke oplossingen worden bepaald waar instabiliteit of stabiliteit niet instabiliteit of stabiliteit die door de numerieke methoden zelf zijn. Numerieke methoden kunnen leiden tot valse positieven en valse

negatieven; moet worden vastgesteld dat er geen artefacten zijn geïntroduceerd in berekeningen van numerieke oplossingsmethoden.

De talrijke complexiteit van het fysieke domein weergegeven met één van de componenten en de bijbehorende gedetailleerde aspecten van een systeem dat de stabiliteit van het systeem beïnvloeden moet (1) realistisch worden opgenomen in de mathematische modellen, (2) nauwkeurig opgelost door de numerieke oplossingsmethoden, en (3) aangetoond dat geen artefacten zijn geïntroduceerd in de berekeningen. De numeriek verbeterde wiskundige stabiliteit van impliciete methoden, het potentieel numerieke instabiliteit van expliciete methoden, en de dissipatieve en verstrooiend kenmerken van impliciete en expliciete methoden vereisen zorgvuldige onderzoeken. [Jensen \(1992\)](#) heeft voorbeelden van enkele van deze effecten gegeven.

Docenten W. Ambrosini en J. Ferreri, in een gezamenlijke inspanning gedurende een periode van ongeveer 10 jaar, en anderen hebben ingediend uitputtend onderzoek naar de effecten van numerieke benaderingen aan de continue modelvergelijkingen en de numerieke oplossingsmethode voor deze, op berekeningen van het intreden van instabiliteit voor natuurlijke circulatie en parallelle kanalen stromen. Een paar voorbeelden zijn [Ferreri en Ambrosini, 1999](#) ; [Ferreri en Ambrosini, 2002](#) ; [Ambrosini en Ferreri, 1997a](#) ; [Ambrosini en Ferreri, 1997b](#) ; [Ambrosini en Ferreri, 1998](#) ; [Ambrosini en Ferreri, 2000](#) ; [Ambrosini en Ferreri, 2003](#) ; [Ambrosini en Ferreri, 2006](#) ; [Ferreri, 1999](#) ; [Ferreri et al., 1995](#) ; [Ambrosini et al., 2001](#) , en [Ambrosini, 2001](#) ; [Ambrosini 2008](#) , onder vele anderen. De onderzoeken hebben speciale computer codes in frequentie en tijd domein en het RELAP5 systeem analyse code. [Mangal et al. \(2012\)](#) hebben ook vergeleken RELAP5 berekeningen met NCL eigenschappen.

16.10.5. Generatie IV passieve restwarmte afvoersystemen

De meeste analytische en experimentele onderzoeken naar NCLs zijn gebaseerd op een enkele geïsoleerde lijn. Daarentegen passieve koeling van kerncentrales basis van natuurlijke circulatie operatie vereist gekoppelde lussen als volgt. Voor de veilige uitschakeling voorwaarde voor natuurlijke circulatie Gen IV machines, wordt de passieve resterende hitteverwijderingssysteem (PRHRS) bestaande uit twee gekoppelde natuurlijke-circulatiesystemen: één die de energie van de RPV en de tweede die afzettingen energie transporteert in de ultieme koellichaam. De laatste werkwijze is de tweede NCL en de koppeling met de primaire kringloop is via een tussenliggende HEX. Dat HEX is algemeen hetzelfde zijn als bij normale werking van de machine-SG. De energie wordt gestort op de ultieme koellichaam, in het algemeen een grote pool van water door middel van een tweede HEX.

De bron van de energie in het primaire NCL de brandstofstaven in de reactorkern, het koppelmechanisme tussen de twee lussen het SG en een tweede HEX wordt gebruikt in de secundaire lus van de energie in het koellichaam deponeren. Al deze apparatuur en de bijbehorende één- en twee-fasen thermische-hydraulische verschijnselen en processen, moeten worden verwerkt in de mathematische modellen ontwikkeld voor het systeem.

De fluïdumstroom door de kern, door de SG en PRHRS HEX, gekenmerkt door stroming door parallelle kanalen. De kanalen in de kern worden gevormd door de splitsstofstaven en die in de SG en PRHRS met dichte stroom-buiskanalen. Zoals stromingsconfiguraties evenwijdige stromingskanalen, zijn gevoelig voor

instabiliteiten voor één- en twee-fase stroomt. Onder de lange termijn de veilige shut-down voorwaarden de PRHRS zal naar verwachting een tweefasen stroom systeem.

Voor Gen IV systemen die integraal insluiting hebben en in het geval van een interne leidingen breken op de insluiting, moet drie gekoppelde NCLs goed werken om verwijdering van de energie van de kern te verzekeren. Een opening onderaan de RPV moet zo worden bepaald dat de uitgestoten koelmiddel terugkomen van de insluiting naar het kerngebied van de SG om energie te vervoeren naar de PRHRS HEX.

In het algemeen worden Hoofdbouwstenen-analyse codes uitgerust met alle componenten apparatuur en bijbehorende fysische verschijnselen en processen die naar verwachting zullen optreden modelleren. De codes en gemodelleerd natuurlijke circulatie en parallelle kanalen stromen voor het gekoppelde NCL geval vereist validatie door vergelijking van voorspellingen met experimentele gegevens. De belangrijkste codes, het aantal speciale codes en modellen en procedures applicatie lokaal ontwikkeld werden bevestigd met gebruik van veel van de eenvoudige zuivere thermische hydro experimenten en analytische resultaten NCLs en parallelle kanalen stromen. Echter, in het algemeen, de universele bekende codes moeten worden gevalideerd voor toepassingen gekoppelde lussystemen ontwerp, ontwikkeling van diepe begrip en veiligheid-grade analyses voltooien.

16.10.6. Gekoppeld natuurlijke circulatie loops

De weinige onderzoek naar de eigenschappen en kenmerken van gekoppelde NCLs omvatten [Salazar et al. \(1988\)](#) voor het geïdealiseerde gekoppelde lussen met gespecificeerde energietoevoer en extractie via primaire en secundaire lussen respectievelijk. [Wu \(2011\)](#) heeft bij een algemene aantal gekoppelde lussen volgens de geïdealiseerde benadering Welander geanalyseerd. Het rekenmodel reduceert tot een stelsel van gekoppelde gewone differentiaalvergelijkingen (GDV) analoog aan een gekoppelde volgens de vergelijkingen ontwikkeld door [Lorenz \(1963\)](#).

De belangrijkste experimentele lus voor onderzoek naar PRHRS gekoppelde lussen en afzonderlijke componenten, lijkt de VISTA inrichting (be [Park et al., 2014](#)) in Korea. Deze faciliteit, genoemd Keuring door Integral Simulatie van transiënten en ongevallen-Integral Test Loop (VISTA-ITL), is ontwikkeld om experimenten met gekoppelde NCLs mogelijk te maken. De experimentele gegevens zijn ter validatie van de TASS / AMR-S ([Yang et al., 2008](#)) en MARS-KS thermische-hydraulische modellen en codes ([Park et al., 2008](#) ; [Park et al., 2014](#)). De gegevens kunnen ook worden gebruikt door andere organisaties ter validatie analyses. De VISTA-ITL faciliteit wordt ook gebruikt voor experimenten op de onderdelen die deel uitmaken van het volledige systeem ([Kim et al., 2013](#)). Een kleine NCL, de Purdue University Multidimensional integrale testopstelling (POEMA), ging ten Purdue University ([Ishii et al., 1996](#)). De Oregon State University-Multi-Application Kleine Lichtwaterreactor (OSU-MASLWR) lus in de Verenigde Staten is een schaalmodel van de volledige NuScale natuurlijke circulatie machine ([Mascari et al., 2012](#)).

[Men et al. \(2014\)](#) hebben experimenten uitgevoerd op natuurlijke convectie warmteoverdracht een PRHRS HEX in een in-containment tanken wateropslagtank. Verschillende empirische correlaties voor geforceerde convectie stroming intern in de HEX buis en de natuurlijke convectie warmteoverdracht buitenzijde van de buis in de tank, de verticale en horizontale gedeelte van de buis, vergeleken met de experimentele gegevens. De Dittus-Boelter geforceerde convectie correlatie en de McAdams correlaties voor natuurlijke convectie bleek het beter

model van de gegevens. [Wenbin et al. \(2014\)](#) hebben experimenten uitgevoerd voor de secundaire lus van de Chinese Advance drukwaterreactor voor de validatie van de MISAP20 modellen en code. Deze en andere papieren in een speciale uitgave van de *Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties* tijdschrift uitgegeven in 2014, zoals aangegeven door de aangehaalde referenties.

16.10.7. Superkritische vloeistof staten en natuurlijke circulatie loops

De historische onderzoeken in de jaren 1960 in superkritische vloeistoffen voor NCLs en machines kernonderzeeërs zijn eerder genoemd. [Chatoorgoon, 1986](#) ; [Chatoorgoon 2001](#) en [Chatoorgoon et al, 2005a.](#) ; [Chatoorgoon et al., 2005b](#) gepresenteerd extra vroeg bronnen naast het maken van nieuwe bijdragen. De hernieuwde belangstelling voor superkritische vloeistof staten om de macht toepassingen nucleaire heeft geresulteerd in vele nieuwe experimentele, analytische en numerieke onderzoeken.

De [IAEA \(2014\)](#) heeft een gedetailleerd overzicht van de vele aspecten van superkritisch natuurlijke circulatie thermohydraulica en warmte-overdracht voor water reactors geproduceerd. De IAEA heeft SCWR concepten die in Canada, China, Japan, Korea, Rusland en het Euratom-organisatie. Een verslag over de zevende Internationale Symposium over SCWRs is vrijgegeven ([Penttila 2015](#)). Superkritisch CO₂ is ook voorgesteld als werkvloeistof. [Sarkar et al. \(2014\)](#) gaf een state-of-the-art beoordeling van superkritisch water en [Vijayan et al. \(2013\)](#) hebben de steady-state en stabiliteitseigenschappen superkritisch CO₂ onderzocht NCLs. [Ampomah-Amoako en Ambrosini \(2013\)](#) hebben CFD toegepast voor analyse van de stabiliteit van stromen superkritische stroming.

De aanzienlijke snelle veranderingen in thermodynamische staat, vervoer, en met thermische eigenschappen ondervonden bij de behandeling van vloeistoffen onder superkritische omstandigheden het openen van een potentieel voor instabiliteit. Goed voor deze variaties en de bijbehorende gevolgen voor vloeistofstroming en warmteoverdracht maakt ontwikkeling van warmteoverdracht en wrijvingsfactor ingenieursmodellen en correlaties moeilijk. De significante veranderingen treden direct in de vloeistof en zo direct de stroom onder natuurlijke circulatie omstandigheden beïnvloeden. [Ambrosini \(2007\)](#) heeft een analogie tussen superkritisch staten en koken getrokken.

De warmte-overdracht en wrijving factor correlaties voor superkritisch fluïdum staten, en de stabiliteit van de gebruikte in de experimenten stromen, zijn de onderwerpen van vele studies door de jaren heen. [Pioro en Duffey, 2003](#) ; [Pioro en Duffey 2005](#) , [Duffey en Pioro \(2005\)](#) , en [Pioro et al. \(2004\)](#) voltooide uitputtend en uitgebreide reviews van de literatuur die tijd, het samenstellen van grote hoeveelheden van de literatuur, en de herziening van wrijving factor en warmteoverdrachtscoëfficiënt correlaties, en stabiliteit, onder andere kwesties. [Cheng en Schulenberg \(2001\)](#) de literatuur voor toepassingen naar de high-performance LWR. Recent onderzoek dat deze informatie aan te vullen bevatten [Zhang et al., 2010](#) ; [Bae en Kim, 2009](#) ; [Bae 2011](#) ; [Chen et al, 2014.](#) ; [Zhao et al, 2014.](#) ; [Gu et al, 2015a.](#) ; [Gu et al., 2015b](#) , en [Tilak en Basu \(2015\)](#) . Het IAEA-rapport ([2014](#)) en de conferentie een procedure door [Penttila \(2015\)](#) een overzicht van de meest recente informatie.

[Swapnalee et al. \(2012\)](#) en [Chatoorgoon \(2013\)](#) hebben de dimensieloze getallen ontwikkeld door gevalideerde [Ambrosini en Sharabi \(2008\)](#) en [Debrah et al. \(2013\)](#) voor het superkritisch fluïdum data. [Zhang et al. \(2010\)](#) hebben een

driedimensionaal model en numerieke oplossingsmethode voor het geval van een superkritisch CO₂ rechthoekig NCL.

[Jain en Conradini \(2006\)](#) rapporteerde een verschil tussen modelvoorspellingen en experimentele gegevens met een tijd-domein model wijzen op instabiliteit en superkritisch CO₂ NCL data die de stabiliteit. Voor superkritisch water een overgang naar een meer bijna nauwkeuriger EoS in het frequentiedomein analyse gaf stabiliteit. Het frequentiedomein studies bleef instabiliteit van het superkritische CO₂ systeem; dus zijn ze nog steeds niet in overeenstemming met experimentele data. Het frequentiedomein analyses voor superkritisch water en CO₂ niet altijd overeenkomt met de tijdsdomein resultaten.

[Jain en Rizwan-Uddin \(2008\)](#) melden dat de aanzienlijke afwijkingen van de resultaten gerapporteerd door [Chatoorgoon et al. \(2005b\)](#) van de numerieke voorspellingen met de Stroom Instabiliteit analyse onder superkritische Bedrijfsomstandigheden (FIASCO) model en code waarschijnlijk vanwege de grotere tijdstap afmetingen in eerdere studies. Een grotere tijd-stapgrootte toenemen numerieke dissipatie en dispersie en geeft dus aan dat stabiele toestanden als gevolg van numerieke artefacten en geen fysieke werkelijkheid. [Chatoorgoon et al. \(2007\)](#) gemeld dat een time-stapgrootte verfijning studie leidt tot resultaten die in overeenstemming zijn met Jain en Rizwan-Uddin. Verhoging van het drukk niveau met superkritisch CO₂ toont een stabiliserend effect vergelijkbaar met dat in kokende tweefase NCLs. Een vaste kracht, drukverhoging leidt tot verminderde lege fractie, wat leidt tot een afname van wandwrijving en impulsflux drukgradiënten-stabiliserende werking. Het drempelvermogen voor OFI niet overeenkomt met het maximum van de stroom versus vermogenscurve.

16.10.8. Computational fluid dynamics

Overwegingen van verdelingen in het stromingskanaal, dwars op de primaire stromingsrichting, werden eerst in principe één-dimensionale modellen van benadert de temperatuurverdeling in de vloeistof evenwijdig aan de stromingsrichting. Recent is er een toenemende toepassing van CFD diverse één- en twee-fasen thermische-hydraulische analyses, met inbegrip NCLs en superkritisch fluïdum staten, kernenergie systemen. Deze benaderingen ook mogelijk voor een oplossing van de thermische gelaagdheid in horizontale en verticale secties van de lus en de resolutie hellingen loodrecht op de eerste stroomrichting en de gevolgen daarvan voor de berekende stabiliteit. Volledig driedimensionale analyses worden de norm, maar alleen voor eenvoudige geïdealiseerde eenfasige gevallen.

[Burroughs \(2003\)](#) en [Burroughs et al. \(2005\)](#) toegepaste analytische en numerieke methodes om laminaire stroming in de standaard NCL geometrie en waargenomen gedrag van stabiele respons op Prandtl getal kleiner dan die waargenomen bij de gebruikelijke [Lorenz \(1963\)](#) ODE model. [Pilkhwat et al. \(2007\)](#) merkte op dat CFD resultaten toonden aan het begin van de instabiliteiten die niet kon worden waargenomen met standaardééndimensionale analyses. [Angelo et al. \(2012\)](#) hebben CFD aangebracht op de stationaire analyse van een operationele NCL.

[Yadav et al. 2012a.](#) ; [Yadav et al. 2012b](#) toegepast CFD modelling warmteoverdracht en wrijvingsfactor correlaties CO₂ stromen in NCLs en onderzocht prestaties en stabiliteit van superkritisch CO₂ NCLs met HEX BCS. [He et al., 2004](#) ; [He et al., 2008](#) en [Sharabi et al. \(2008b\)](#) toegepaste CFD en turbulentiemodellering de overdracht analyse van superkritische toestanden verwarmen. [Jackson \(2013\)](#) , een van de pioniers in de mixed-convectie

warmteoverdracht gebied, heeft voorgesteld een mooi overzicht van de vele aspecten. [Angelo et al, 2012.](#) ; [Ampomah-Amoako en Ambrosini, 2013](#) ; [DESRAYAUD et al, 2013.](#) ; [Jingjing et al., 2015](#) en [Sharabi et al. \(2008a\)](#) ook onderzocht superkritisch NCLs stabiliteit door een CFD benadering. [Misale et al. \(2000\)](#) introduceerde de effecten van twee-dimensionale warmtegeleiding in NCL stabiliteitsanalyses.

16.10.9. nanovloeistoffen

NCLs vanuit gaat vloeistoffen die nanodeeltjes zijn onderzocht (bijvoorbeeld [Misale et al., 2012](#)). [Yu et al. \(2015\)](#) experimenteel onderzoek gedaan naar de effecten van nanodeeltjes op het ontstaan van kiemkoken (NOB) en OFI. Beide onderwerpen zijn in de beginfase van het onderzoek. Interactie van de nanopartikels met de microscopische structuur van een kookoppervlak aangegeven.

16.10.10. Sodium snelle reactoren

[Aoto et al. \(2014\)](#) presenteerde een overzicht van de recente SFR ontwikkelingen. [Sabharwall et al. \(2012\)](#) onderzochten de effecten van axiale geleiding in het fluïdum van een vloeibaar metaal reactor en geconcludeerd dat het effect klein voor de fluïda van belang en natuurlijke circulatie omstandigheden. De Experimental Breeder Reactor (EBR-II) de ontwikkeling van activiteiten in de Verenigde Staten in de jaren 1980 opgenomen studies van natuurlijke circulatie in deze machine ([Gillette et al., 1980](#) ; [Planchon et al, 1985](#) ; [. Singer et al, 1980](#)). [Ha et al. \(2010\)](#) gevalideerde de MARS-modellen en de code met een EBR-II testgegevens. De [IAEA \(2013\)](#) voerden een blinde benchmark-oefening die gegevens van de PHENIX natriumgekoelde reactor.

16.10.11. parallelle kanalen

De kern van kernreactoren is een voorbeeld van een component in een NCL waarbij stromen parallelle kanalen optreedt. De stabiliteit van de parallelle kanalen stroming door de kern moet worden onderzocht, en deze onderzoeken omvatten effecten conjugaat warmtegeleiding en energieproductie door deling in het materiaal grenzend aan het fluïdum. Één- en twee-fase stroomt onder steady-state en overgangstoestanden zijn belangrijke overwegingen met betrekking tot veiligheidsanalyses van Gen IV machines.

Zoals bij de voorgaande paragrafen, is er een grote literatuur over de stabiliteit van de vloeistofstroom in één en multiparallel kanalen. De toetsing door [Kakac en Bon \(2008\)](#) is bijzonder compleet die tijd. [Ruspini \(2013\)](#) en [Ruspini et al. \(2014\)](#) onder meer deze situatie in hun beoordeling. [Munoz et al. \(2002\)](#) en [Vyas et al. \(2010\)](#) studeerdeparallelle kanalen instabiliteit in BWR. Recente activiteit is gericht op het superkritische thermodynamische toestanden. [Xiong et al, 2013.](#) ; [Xiong et al, 2012.](#) , [Gu et al, 2015a.](#) ; [Gu et al., 2015b](#) en [Dutta et al. \(2015\)](#) hebben alle onderzochte het begin van instabiliteit, in enkelvoudige en parallelle kanalen, voor het superkritisch fluïdum thermodynamische toestand case.

De RELAP5 modellen en code gevalideerd met fundamentele gegevens OFI bij enkele en parallelle kanalen ([Hamidouche en Bousbia-Salah, 2006](#) ; [Gartia et al., 2007](#) ; [Colombo et al, 2012a.](#)). [Kommer \(2015\)](#) heeft de TRACE code (getest [US NRC, 2008](#)) van simulaties van OFI voor eenvoudige en parallelle kanalen.

De parallelle stromingskanalen in de spiraalvormige spoel SG die wordt gebruikt in integrale RBE een potentieel voor instabiliteit. Experimenteel en theoretisch onderzoek naar de stabiliteitseigenschappen van het parallelkanaal stroom is gegeven door [Guo et al. \(2001\)](#) en [Colombo \(2013\)](#) . [Colombo et al. \(2012b\)](#) en [Papini et al. \(2014\)](#) hebben de RELAP5 modellen en code gevalideerd voor deze toepassing.

16.11. Het modelleren van natuurlijke circulatie loops

Single NCLs zijn verstreken sinds de vroege jaren 1950 het onderwerp van experimentele, analytisch en numeriek onderzoek al tientallen jaren. In de literatuur is zeer uitgebreid met onderzoek voort tot op de dag. Een groot deel van het onderzoek is gericht op diverse systemen van de opwekking van elektriciteit door kerncentrales. Een kort overzicht van enkele van de literatuur is eerder in dit hoofdstuk gegeven.

Anderzijds, systemen bestaande uit twee of meer gekoppelde NCLs zijn niet veel onderzocht. De doelstellingen van deze toetsen zijn ontwikkeling van modelvergelijkingen voor steady-state en transiënte stromen in gekoppelde NCLs, waaronder realistische BC representaties. Het ontwerp van dergelijke systemen, een interessante optimalisatie probleem, is hier niet aan bod.

16.11.1. Een kanaal of parallelle kanalen

Alvorens NCLs, een korte samenvatting van de basisvergelijkingen voor stabiliteit modellering en analyse op een enkel kanaal, of parallelle kanalen, wordt in de volgende paragrafen. De kans op instabiliteiten optreden in apparatuur gebaseerd op parallelle kanalen stromen bestaat in de kern en SG van Gen IV machines.

Het model voor massa, momentum, en de energiebalans en de EOS die nuttig zal zijn in de volgende discussies zijn samengevat in de volgende paragrafen. Elk aantal leerboeken over gedetailleerde afleidingen en discussies (bijv [Todreas en Kazimi, 1990](#) ; [Collier en Thome, 1996](#)). Een gemiddelde-gebied, transiënte zal eendimensionale formulering voor samendrukbare media voldoende voor de toepassingen die in dit hoofdstuk zijn. Sommige aspecten van de verantwoording van afzonderlijke snelheden voor damp en vloeistoffasen in een tweefasenmengsel zijn ook inbegrepen.

Massabehoud voor het mengsel van vloeistof plus damp

vergelijking[16.1]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho A_f + \frac{\partial}{\partial z} W = 0$$

[Schakel MathJax op](#)

Het mengsel massastroomsnelheid is de som van de vloeistof- en dampstromen,

vergelijking[16.2]

$$W = W_l + W_g$$

[Schakel MathJax op](#)

waarbij $W = \rho u A_f$, $W_l = \alpha_l \rho_l u_l A_f$, en $w_g = \alpha_g \rho_g u_g A_f$; α is de lege fractie; ρ is de dichtheid van het fluïdummengsel; en U is het fluïdummengsel snelheid in de

axiale richting parallel aan de stroming kanaalwanden. Het stromingsgebied kan variëren in de stromingsrichting. Andere hoeveelheden die nodig zijn in de volgende ontwikkelingen zijn de massafractie ingenomen door elke fase of vloeistof in een volume van fluïdummengsel, $\bar{X}_l^m = M_l/M$ $\bar{X}_g^m = M_g/M$ $M = \rho V$,
 Waarbij $M_l = \alpha_l \rho_l V$ en $M_g = \alpha_g \rho_g V$. Massabehoud de dampfase vergelijking[16.3]

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_g \rho_g A_f + \frac{\partial}{\partial z} W_g = \dot{m}_{lg} A_f$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waar $\dot{m}_{lg}$ de netto massa-uitwisseling, per eenheid vloeistofvolume, tussen de vloeistof en damp die aangepast vloeistof tot damp als positief genomen. Bijvoorbeeld in het geval van onderkoelde koken, het net stofuitwisseling wordt gegeven door het verschil tussen het gedeelte van het warmteoverdrachtsmedium dat gaat naar veranderingen en de condensatietemperatuur van die damp in de onderkoelde vloeistof (fase bijvoorbeeld [Hughes et al., 1981](#)).

Een impulsbalans model voor het mengsel van vloeistof plus damp

vergelijking[16.4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} W + \frac{\partial}{\partial z} \frac{W^2}{\rho A_f^2} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{X}_g^m \bar{X}_l^m \rho V_{SL}^2 = & - \frac{\partial}{\partial z} P - K_{wf} \frac{W|W|}{\rho A_f^2} \\ & - K_{\parallel} \frac{1}{2} \frac{W^2}{\rho A_f^2} \delta(z - z_{\parallel}) - \rho g \cos \theta \end{aligned}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij θ de hoek tussen de stroomrichting en het verticaal omhoog positieve z -as en $\delta(z - z_{\parallel})$ is de Dirac-delta-functie, waarbij $z_{\parallel}$ is de locatie van een plaatselijke stroming verstoring. De derde term aan de linkerzijde rekeningen in de impulsflux term voor het snelheidsverschil tussen de damp en vloeistof, $V_{SL} = (u_g - u_l)$ is, en gewoonlijk aangeduid als slip velocity. De tweede en derde term aan de rechter kant moet het grootste tweefasigheid van het mengsel gewoonlijk door middel van twee fasen vermenigvuldigers of mechanistisch model van het stromingsveld. De derde term vertegenwoordigt onomkeerbare drukverliezen op belangrijke geometrische kenmerken van het stromingsveld. Bijdrage tot de impulsbalans vanwege stofuitwisseling verwaarloosd omdat het algemeen klein en meestal geen significante invloed op de beweging van beide fasen evenwijdig aan de stroom kanaalwanden. De snelheid van elke fase of vloeistof kan worden uitgedrukt in termen van het mengsel en de slip snelheid met $u_l = u - \bar{X}_g^m V_{SL}$ and $u_g = u + \bar{X}_l^m V_{SL}$. Een model is nodig voor de slip snelheid, en een paar opties beschikbaar. De impulsvergelijking modellen voor de vloeistof en damp kan worden afgetrokken om een volledig dynamisch model van het verschil krijgen. Deze vergelijking kan verder worden vereenvoudigd tot de interfase-wrijving en zwaartekrachtgedomineerde geval een algebraïsche vergelijking voor het snelheidsverschil te krijgen. Deze vereenvoudigde dynamische slip benadering vormt de basis voor een drift-flux model benadering die vaak wordt gebruikt om een snelheidsverschil. Als alternatief kan elk van de vele algebraïsche slip verhouding modellen en correlaties kunnen worden gebruikt. De twee momentum vergelijkingen en de ontwikkeling van de snelheid slip van hen zijn niet meegenomen in dit hoofdstuk. In het algemeen worden de meer

gedetailleerde tweefasenstroming modellen toegepast op problemen door het gebruik van computermodellen die gebaseerd zijn op de meer gedetailleerde benaderingen.

De energiebesparende model van het mengsel op basis van de enthalpie formulering vergelijking[16.5]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h A_f + \frac{\partial}{\partial z} \left(W h + \bar{X}_g^m \bar{X}_l^m \rho A_f (h_g - h_l) V_{SL} \right) = p_{wh} q_w''$$

Schakel MathJaxop

waarbij p_{wh} de verwarmde omtrek van de wand en q_w'' de muur tot mengsel warmteflux.

De EoS retourneert de dichtheid en temperatuur als functie van twee onafhankelijke thermodynamisch statuseigenschappen; bijvoorbeeld, $\rho_l = \hat{\rho}_l(P, h_l)$ $T_l = \hat{T}_l(P, h_l)$. In plaats van het behandelen van de volledige thermische evenwichts, ongelijke temperaturen geval een minder algemene benadering is om de damp te nemen om in de verzadigingstemperatuur overeenkomend met de plaatselijke druk

$\rho_g = \hat{\rho}_{gs}(P)$ $T_g = \hat{T}_{gs}(P)$ $h_g = \hat{h}_{gs}(P)$ ([Hughes et al., 1981](#) ; [Hughes en Katsma, 1983](#)). Deze veronderstelling is bewezen goed voor de meeste tweefasenstroming regimes te zijn, maar in het algemeen kan niet worden uitgebreid tot alle tweefasenstroming situaties. Het model balansvergelijkingen met een vergelijking voor het snelheidsverschil en EoS voldoende om het systeem op te lossen.

De wand warmteflux, q_w'' Kan op verschillende manieren worden behandeld: (1) als een bepaald constant; (2) als een gespecificeerde functie van de plaats langs het stromingskanaal; (3) door nucleaire reacties in de vaste begrenzend wand de vloeistof en beschreven in punt kinetiek of temporele en ruimtelijke variaties in neutronenvervoer en gekoppeld aan warmteoverdracht tussen de vloeistof en muur vergelijking[16.6]

$$q_w'' = h_{cw}(T_w - T)$$

Schakel MathJaxop

waarbij h_{cw} de muur tot vloeistof convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt, of (4) bepaald door de prestaties van een HEX.

Voor het koken van een verzadigd mengsel van de massa-uitwisseling per volume eenheid

vergelijking[16.7]

$$\dot{m}_g = \frac{h_{cw} \bar{A}_{wh} (T_w - T)}{(h_{gs} - h_{ls})}$$

Schakel MathJaxop

waar $\bar{A}_{wh}$ het verwarmde wandoppervlak per eenheid vloeistofvolume. Voor massatemperatuur dan de verzadigingswaarde wordt modellen nodig voor de muur tot fase kWh-en massatransport.

Bij koken in de stromingskanalen, de meest interessante geval vereist een enigszins gedetailleerde behandeling van de warmteoverdrachtmechanismen muur tot vloeistof langs het kanaal. Over het algemeen verticale opwaartse stroming in een verwarmd kanaal teneinde een onderkoeldeinlaat van de toestand van de wand wordt gewoonlijk beschreven als volgt. Convectie warmteoverdracht naar onderkoeld

vloeistof treedt de nucleatie (oon) met oververhitte vloeistof grenzend aan de verwarmde wand en een onderkoelde massa vloeibare toestand, ONB gedeeltelijke onderkoelde kokende begin van significante void (OSV), volle onderkoeld koken en verder door verzadigde koken en hoge fractie aan leeg volume vloeistoffilm verdamping, aan gedispergeerde stroom koken en aansluitend naar warmteoverdracht oververhitte eenfasige damp. In het algemeen worden de details van het kookpunt tussen de oon en bubble vertrek niet opgelost. Al deze kunnen daarbij onder natuurlijke convectorie, gemengde convectorie, of natuurlijke circulatie omstandigheden en elk hiervan als laminaire of turbulente stroming. Tegelijkertijd moeten gedetailleerde beschrijvingen van de muur tot vloeistofwrijving ook naar de toestanden van het fluïdum nabij de wand en in de bulk. Het aantal empirische correlaties nodig om alle mogelijkheden van warmteoverdracht en wandwrijving dekken groot.

Sluit goed voor het koken mechanismen heeft geleid tot vroege successen in de voorspelling van stabiliteit grenzen ([Grace en Krejsa 1967](#) ; [Jeglic en Grace, 1965](#) ; [Lowdermilk et al, 1958](#)). In het algemeen, wanneer de nadruk ligt op een punt van aanzienlijke veranderingen, in tegenstelling tot distributies close onderzoek van elke term in de modelvergelijkingen vereist. Bijvoorbeeld kunnen de afzonderlijke termen in deze vergelijkingen worden toegewezen aan de lijst van instabiliteit initiëren fenomenen die in [sectie 16.10](#) .

Superkritische vloeistof staten, hoewel het vermijden van een aantal van deze mechanismen, hebben unieke warmte-overdracht en de muur wrijving kenmerken die moeten worden aangepakt. De snelle veranderingen in de thermodynamische staat en thermofysische en transporteigenschappen van superkritisch fluïdum toestanden (zeer) ruwweg enigszins analoog aan de veranderingen die tijdens het koken normaal vloeistoffen. De verandering van dichtheid als gevolg mengsel aan de kook en knipperende of condensatie, is een voorbeeld.

Gedetailleerde beschrijvingen van alle van de stroming en warmteoverdracht mechanismen valt buiten het bestek van de huidige tekst. Bovendien is het moeilijk om een definitieve lijst van voorgestelde gegevens en correlaties voor alle mogelijke combinaties van stroming en warmteoverdracht mechanismen, vooral als stroom-kanaalgeometrie effecten en superkritisch fluïdum toestanden in aanmerking worden genomen. Zie het literatuuroverzicht in dit hoofdstuk voor aanvullende informatie.

Beginvoorwaarden en BC's moeten worden opgegeven voor kortstondige toepassingen en BC's alleen voor steady-state-toepassingen. Typische BC sets bevatten (1) stroming en thermodynamische toestand ontvangen bij de inlaat van een stromingskanaal en aangegeven druk bij de uitlaat en (2) de drukverandering in het stromingskanaal wordt gespecificeerd. In het eerste geval de berekeningen geven de druk aan de inlaat en langs het kanaal en de verdeling van de thermodynamica toestand langs het kanaal. In het tweede geval, de berekeningen geven de stroming en de druk en temperatuur langsheen het kanaal.

Bijna alle analytische onderzoek naar parallelle kanalen en NCL instabiliteit zijn gebaseerd op een subset van de algemene vergelijkingen hiervoor gegeven. [Muñoz-Cobo et al. \(2002\)](#) gebruiken een nul-dimensionale benadering en [Ambrosini et al. \(2001\)](#) gebruikt eendimensionale modellen, nauwkeurige eindige verschil benaderingen en numerieke oplossingsmethoden. Onderzoeken op basis van een meer algemene formulering van het probleem worden meestal uitgevoerd met computermodellen van de stroming situatie ([Ambrosini en Ferreri, 2006](#)). Gegevens

uit experimenten die werden ontwikkeld om de minder algemene formuleringen te testen worden ter validatie oefeningen voor de meer algemene computermodellen. Naarmate de tijd vordert zowel de experimenten en de computer modelberekeningen bewegen in de richting van een verhoogde ruimtelijke resolutie en meer gedetailleerde wiskundige modellen van het fysieke domein. Een aantal van de gedetailleerde onderzoeken zijn samengevat in het literatuuroverzicht in dit hoofdstuk.

De nuldimensionale benadering wordt vaak toegepast op de afzonderlijke gebieden kokend kanalen en systemen. De algemene vergelijkingen gespecialiseerde en aan de enkelfasige, nonboiling en onderkoeld gedeeltelijke koken delen; de verzadigde kokende grens; de stijgbuis boven de verhitte energiebron; enzovoort (bijvoorbeeld [Ishii, 1976](#) ; [Anderson et al, 1962](#) , [Yadigaroglu en Bergles 1969](#)). De nuldimensionale benadering heeft het voordeel dat goed voor de thermische reactie van het vaste materiaal nabij de vloeistof eenvoudig. De nuldimensionale benadering heeft ook het voordeel dat een stelsel van GDV wordt verkregen en deze kunnen worden opgelost voor elke bestelling van de vereiste nauwkeurigheid bij off-the-shelf ODE systeem oplossers.

Studies van de statische OFI worden uitgevoerd met de steady-state vorm van de vroegere vergelijkingen (bijv [Duffey en Hughes, 1991](#) , [Rohatgi en Duffey, 1998](#) , [Duffey en Sursock, 1987](#) ; [Zvirin et al., 1981](#)). [Chatoorgoon 2001](#) ; [Chatoorgoon 2013](#) heeft de aanpak van de superkritische vloeistof Staten worden toegepast. De correlatie van [Whittle en Forgan \(1967\)](#) is aangetoond dat het een goede match met de experimentele gegevens. De auteurs suggereerden dat OFI ongeveer overeenkomt met bubble onthechting, OSV, voor het geval kokend van onderkoeld water.

Constance totale drukval over het kanaal BCs wordt gewoonlijk opgelegd door gebruikmaking van een grote bypasskanaal of door het aanbrengen van grote plena naar de ingang en uitgang. Parallelle kanalen tests worden ook uitgevoerd met grote plena. Kanalen waarin de drukval wordt opgelegd door pompvermogen geïnjecteerd in de vloeistof gewoonlijk niet constant drukverval systemen. Voor toepassingen in het frequentiedomein het vergelijkingssysteem gelineariseerd om een gelijkmatige begintoestand.

Het faseverandering nummer en het nummer onderkoeling zijn dimensieloze groepen die worden gebruikt om de gebieden van stabiele en onstabiele respons-stabiliteit kaart weer (zie [Ishii, 1976](#) , [Rohatgi en Duffey 1998](#) onder tientallen anderen).

vergelijking[16.8]

$$N_{ph} = \frac{Q}{Wh_{fg}} \rho_{fs} \left(\frac{1}{\rho_{gs}} - \frac{1}{\rho_{ls}} \right)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en

vergelijking[16.9]

$$N_{sub} = \frac{(h_{ls} - h_{in})}{h_{fg}} \rho_{fs} \left(\frac{1}{\rho_{gs}} - \frac{1}{\rho_{ls}} \right)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Experimentele studies hebben de volgende kenmerken aangegeven:

Instabiliteit kan worden ingebracht door een toename van de stroom het fluïdum en een daling van het massadebiet.

Een toename van lokale drukverlies aan de ingang altijd stabiliseren terwijl een toename van de plaatselijke verlies bij een tweefasige uitgang altijd zeer destabiliserend.

Een samendrukbare volume na inlaatrestrictie leidt tot instabiliteit.

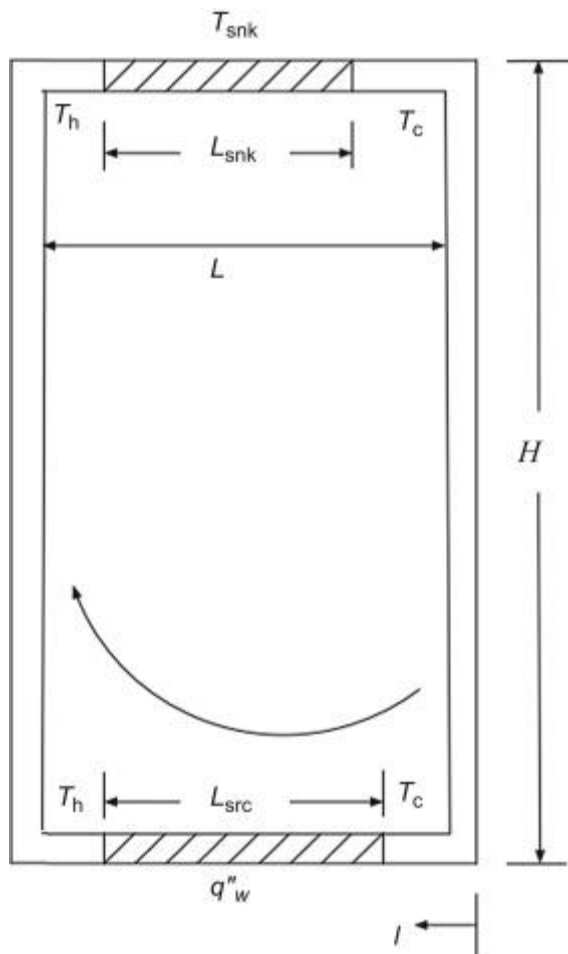
In het algemeen worden verdeeld wandwrijving en typisch verliezen in één-fasegebied altijd stabiliseren.

Deze eigenschappen zijn in volledige overeenstemming met degenen die werden ontdekt in de jaren 1950 voor de stabiliteit van NCLs.

Validatie systeembrede analyse codes door vergelijking van voorspellingen met experimentele gegevens noodzakelijk voor toepassingen van de modellen en codes Gen IV machines. [Rohde et al. \(2010\)](#) hebben in vergelijking ATHLET en TRAGG code voorspellingen met gegevens uit het geschaalde GENESIS faciliteit voor toepassingen op het ESBWR. [Colombo, 2013](#) ; [Colombo et al, 2012a.](#) ; [Colombo et al., 2012b](#) en [Papini et al. \(2014\)](#) hebben de RELAP5 / MOD3.3 modellen en code toegepast op experimentele gegevens tweefasenstromingen in modellen van een schroeflijnvormig gewikkelde SG van het te gebruiken type Gen IV SMR. [Gartia et al. \(2007\)](#) hebben de RELAP5 systemen analyse code toegepast bij een NCL met parallelle kanalen. [Vyas et al. \(2010\)](#) een experiment met kokend en 10 parallelle kanalen. [Xiong et al, 2012.](#) ; [Xiong et al., 2013](#) presenteerde modellering en analyse van superkritisch water stroomt in parallelle kanalen. [Walter en Linzer \(2006\)](#) onderzocht de effecten van drukniveau per NCL twee ongelijk verwarmde evenwijdige pijpen.

16.11.2. Single natuurlijke circulatie

Alvorens de gekoppelde NCL geval is, zal het enkel geval NCL kort worden samengevat. Een schets van een enkele NCL is getoond in [Fig. 16.3](#) . De BC aan de bron wordt verondersteld een constante energievoorziening, en de spoelbak wordt waargenomen door een constante warmte-overdrachtscoëfficiënt en koellichaam te leveren. Deze zijn relatief eenvoudig BCS en de horizontale bron en wastafel ook modellering en analyse te vereenvoudigen. [Rao et al, 2005a.](#) ; [Rao et al, 2005b.](#) ; [Rao et al, 2005c.](#) ; [Rao et al, 2005d.](#) ; [Rao et al., 2008](#) lijkt de eerste te zijn realistisch geacht BCs vertegenwoordigd door HEXs te zijn. [Kumar en Gopal \(2009\)](#) hebben ook geanalyseerd een NCL met HEX BCS.



Figuur 16.3.
Single natuurlijke circulatie.

Figuur opties

Merk op dat de energiebron en wastafel getoond horizontaal in [Fig. 16.3](#). Andere opstellingen omvatten het hebben van de bron en / of zinken in een verticaal segment, of met één of ander van de bron- of sink verticaal en de andere horizontaal. De bron is altijd op een lagere hoogte dan de wastafel in alle gevallen. Bij horizontale bron- en bestemmingszijde het thermisch centrum van de bron en sink uitsluitend bepaald door de geometrie van het systeem en zijn niet afhankelijk van de thermische processen die plaatsvinden binnen de BCS.

De stromingsrichting is aangetoond dat in rechtse zin, maar NCLs zal in beide richtingen, tenzij middelen worden toegepast om unidirectionele doorstroming. Bovendien, de eenvoudige geometrie van de lus in [Fig. 16.3](#) is idealisering van de mogelijke geometrie van NCLs, die in plaats complex kan zijn, met verschillende weglengten, stroomgebieden en sanitaire voorzieningen.

Het NCL getoond in [Fig. 16.3](#) moet een middel om het drukniveau in het systeem (bijvoorbeeld een drukregelvat gedeeltelijk gevuld met vloeistof en de overige gevuld met een gas of damp, verbonden met de lus de leiding) te onderhouden. Zelfs een eenvoudig model van een drukregelvat zou extra vrijheidsgraden die niet nodig zijn voor de volgende discussie te introduceren. Merk echter op dat de dynamiek van het drukregelvat invloed op de dynamiek van het systeem. Deze effecten zijn over het algemeen niet opgenomen in de meeste analytische modellen.

Geen lekkage paden worden beschouwd voor de meeste analyses van eenvoudige NCLs; de lus wordt gesloten, waardoor de massa in het systeem constant is. Bijvoorbeeld van dampen en condensaat injectie, een NCL met doorstroming

([Mertol et al., 1981](#)), wordt hier beschouwd. Merk op dat de dynamiek van het BCP en de dynamiek van deze aanvullende overwegingen in werkelijkheid hebben een potentieel om de dynamische respons van het systeem beïnvloeden.

Alleen de single-fase stroming zaak wordt geacht in dit hoofdstuk. In het algemeen, het modelleren en analyseren van de twee-fasestroom NCLs worden uitgevoerd in het tijdsdomein aanvragen systeembrede analyse modellen en computercodes, en deze zijn gebaseerd op zeer gedetailleerde en complexe modellen van tweefasestromingen. Analyses op basis van deze gedetailleerde modellen zijn in principe analytisch onhandelbaar.

Deze eerste samenvatting overwegen alleen loops constante diameter en alle gebruikelijke aannames en idealisering toegepast NCL stromen. Deze idealisering omvatten het volgende:

1. Constant thermofysische en transport eigenschappen van de vloeistof.
2. Uniforme verdeling van stroom-veld hoeveelheden in de stromingskanalen.
3. De vloeistof thermisch uitzetbaar: verschillen in dichtheid met druk worden verwaarloosd.
4. Drijfkrachten vanwege vloeistofdichtheid variaties worden verklaard door de lineaire benadering Bousinesq.
5. Geleiding warmte-overdracht kenmerken van de all piping-wall materialen kunnen worden verwaarloosd bij het modelleren van voorbijgaande reactie.
6. Axial warmtegeleiding in de werkende vloeistoffen en materiaal van de leidingen wordt verwaarloosd.
7. Energie verliezen als gevolg van de buitenkant van de leidingen wordt verwaarloosd.
8. Omzetten van mechanische energie in thermische energie door middel van viskeuze dissipatie verwaarloosd.
9. Druk werkvolume termen in de energievergelijking model ook verwaarloosd.
10. Parallelle stroomwegen overal in de systemen zijn niet verantwoord.

Deze idealisering worden gewoonlijk toegepast op analyses van natuurlijke convectie en natuurlijke circulatie stromen. Merk op dat het gebruik van deze veronderstellingen introduceert de kans dat belangrijke aspecten van het ontstaan van instabiliteiten niet correct zijn. Elk van deze aannames moeten worden gevalideerd, omdat de potentiële effecten op het ontstaan van instabiliteit zijn subtiel. In het algemeen alle veronderstellingen en idealisering vereisen grondige motivering opdat valse positieven en valse negatieven worden geëlimineerd.

Alle wiskundige modellen en computer codes die worden gebruikt voor de veiligheid-grade steady-state en transiënte analyses van nucleaire reactor systemen zijn voldoende algemeen dat vrijwel geen van deze veronderstellingen noodzakelijk zijn. Tweefasenfluïdum staten zijn de norm voor deze modellen en codes. Hoewel veel onder axiale warmtegeleiding in leidingen materialen, twee- en drie-dimensionale modellering binnen de werkende vloeistoffen is een gespecialiseerde applicatie en is onlangs begonnen om aandacht te krijgen.

Met deze aannamen en toepassing van de algemene vergelijkingen vooraf gegeven, wordt het volgende systeem van modelvergelijkingen verkregen. Mass behoud, [Eq. \[16.1\]](#) , geeft vergelijking[16,10]

$$\frac{\partial}{\partial t} W = 0$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

wat geeft
vergelijking[16.11]
 $W = W(t)$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij l meet de afstand langs de lus. De massa debiet is overal hetzelfde en is een functie van de tijd alleen. Bij steady state $W = W_{ss}$.

Integratie van de momentum balans, [Eq. \[16.4\]](#) , in de ring geeft

vergelijking[16.12]

$$\frac{L_t}{A_f} \frac{d}{dt} W = \oint \rho(T) g \cos \theta dl - R_{wf}(W) \frac{W|W|}{\rho A_f^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij de vloeistofdichtheid, $\rho(T)$, wordt aangenomen dat een functie van de temperatuur alleen,

vergelijking[16.13]

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)]$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en de lus stromingsweerstand bestaat uit gedistribueerde wandwrijving en lokale verliezen

vergelijking[16,14]

$$R_{wf}(W) = \left[\frac{1}{8} \bar{A}_{wf} f_{wf} L_t + \frac{1}{2} \sum_j K_{jII} \right]$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij $R_{wf}(W)$ betreft een functie van de massastroomsnelheid, waarover meer wordt gegeven in [sectie 16.11.3](#) .

Voor de lus in [Fig. 16.3](#) , met de bron en wastafel horizontaal, [Eq. \[16.12\]](#) geeft vergelijking[16,15]

$$\frac{L_t}{A_f} \frac{d}{dt} W = \rho_0 \beta g H (T_h - T_c) - R_{wf}(W) \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2}$$

Schake! MathJaxop

De energiebesparing model, [Eq. \[16.5\]](#) , de stroomrichting aangegeven, is
vergelijking[16.16]

$$\frac{\partial}{\partial t} T + \frac{W}{\rho_0 A_f} \frac{\partial}{\partial l} T = \frac{P_{wh}}{\rho_0 C_p A_f} q_w''$$

Schake! MathJaxop

voor de bron energietoevoer aan de onderkant van de lus,
vergelijking[16.18]

$$\frac{\partial}{\partial t} T + \frac{W}{\rho_0 A_f} \frac{\partial}{\partial l} T = 0$$

Schake! MathJaxop

de onverwarmde gedeelten van de lus, en
vergelijking[16.19]

$$\frac{\partial}{\partial t} T + \frac{W}{\rho_0 A_f} \frac{\partial}{\partial l} T = \frac{P_{wh}}{\rho_0 C_p A_f} h_{csnk} (T_{snk} - T)$$

Schake! MathJaxop

voor de energie zinken aan de bovenkant van de lus.

Het recept voor het uitvoeren van een analyse van de stabiliteit modelvergelijkingen is als volgt. Stel en oplossen van de steady-state vorm van de hiervoor genoemde vergelijkingen. Dit geeft de massastroom als functie van de lusweerstand

vergelijking[16.20]

$$R_{wf}(W_{ss}) \frac{W_{ss} |W_{ss}|}{\rho_0 A_f^2} = \rho_0 \beta g H (T_{hss} - T_{css})$$

Schake! MathJaxop

Het temperatuurverschil over de energiebron van [Eq. \[16.16\]](#) is
vergelijking[16.21]

$$T_{hss} = T_{css} + \frac{P_{wh} L_{src}}{W_{ss} C_p} q_w''$$

Schake! MathJaxop

De temperatuur verhouding bij de uitlaat van de gootsteen

vergelijking[16.22]

$$\frac{(T_{snk} - T_{css})}{(T_{snk} - T_{hss})} = e^{-\frac{k_c snk P_{wh} L_{snk}}{W_{ss} C_p}}$$

Schake! MathJaxop

zodat de zijuitgang koude temperatuur
vergelijking[16.23]

$$T_{css} = T_{snk} + \frac{P_{wh} L_{src}}{W_{ss} C_p} q_w'' \left[e^{\frac{k_c snk P_{wh} L_{snk}}{W_{ss} C_p}} - 1 \right]^{-1}$$

Schake! MathJaxop

waarbij de exponent Stanton aantaltijden een oppervlakteverhouding
vergelijking[16,24]

$$\frac{h_{c\text{ snk}} p_{wh} L_{\text{snk}}}{W_{ss} C_p} = \text{St} \frac{A_{\text{hsrc}}}{A_f}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Het element op de rechterkant van [verg. \[16.24\]](#) staat voor de totale thermische conductantie tussen het koellichaam en de energiebron.

Omdat de energie-uitwisseling bij de spoelbak een temperatuurgestuurde werkwijze vormgeving van de energie-uitwisseling inrichting op het aanrecht vereist een iteratieve aanpak. Een soort controlesysteem zal nodig zijn om het systeem te handhaven op bij benadering stabiele omstandigheden bij het gebruik. De resultaten van dit eenvoudig systeem worden vaak uitgedrukt in termen van dimensieloze getallen (bijv [Todreas en Kazimi, 1990](#)), en [Eq. \[16.20\]](#) kan worden geschreven als vergelijking[16,25]

$$\frac{b}{2} \text{Re}^{2-m} = \text{Gr}_{D_{\text{he}}} \left(\frac{H}{L_t} \right)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij het Grashof nummer wat betreft de verwarmde equivalente diameter van de lus leidingen

$$\text{Gr}_{D_{\text{he}}} = \frac{g \beta (T_{\text{hss}} - T_{\text{css}}) D_{\text{he}}^3}{\nu^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en de waarde van m wordt gegeven door de verdeelde wand-wrijvingsfactor correlatie

$$f_{wf} = C_{wf} / \text{Re}_m$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

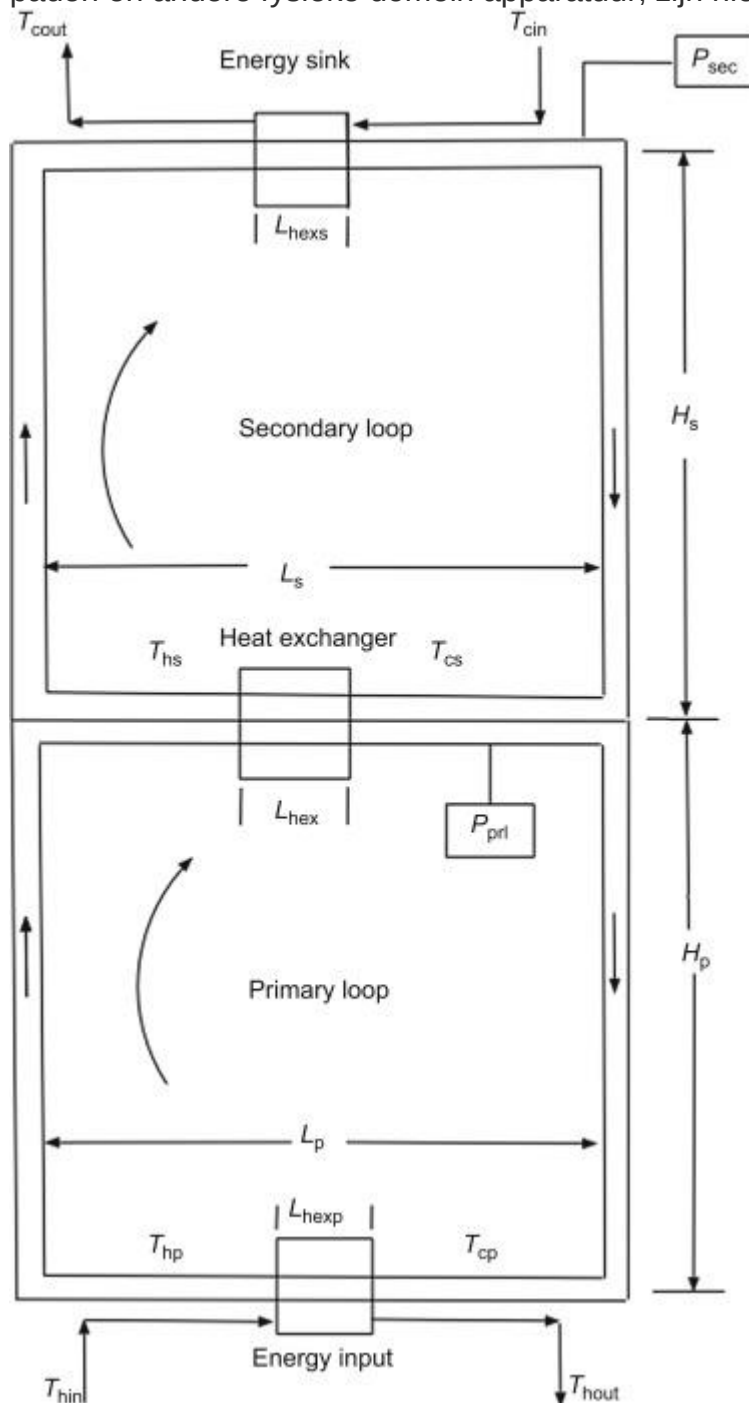
Stabiliteit wordt onderzocht in het frequentiedomein door het beschouwen van de gelineariseerde vorm van de transiënte vergelijkingen. Het lineair systeem kan meestal analytisch worden opgelost; anders worden dan numerieke werkwijzen dan gebruikt. Algebra het bereiken van de uiteindelijke karakteristieke vergelijking is eenvoudig maar enigszins langdurig en vervelend en is hier niet opgenomen. Wederom kan numerieke methoden nodig zijn om de karakteristieke vergelijking op te lossen. Veel van de in de vorige paragraaf genoemde documenten kunnen worden geraadpleegd voor meer informatie. [Rao et al, 2005d.](#) ; [Rao et al., 2008](#) en [Sabharwall et al. \(2012\)](#) hebben gewerkt de details voor de watcomplexe zaken. Stabiliteit in het tijdsdomein wordt onderzocht door middel van numerieke methoden toegepast op de niet-lineaire vergelijkingen.

Deze analyse is een voorbeeld van de klassieke benadering van de analyse van NCLs. Echter, zoals vermeld in de eerdere besprekingen, een aantal aspecten van de werkelijke NCLs in het fysieke domein zijn niet opgenomen in de aanpak. In de praktijk is elk van de weggelaten factoren nodig heeft voor zijn kunnen leiden tot instabiliteit moeten worden aangepakt.

16.11.3. Gekoppeld natuurlijke circulatie loops

De overeenkomstige modellering voor gekoppelde NCLs wordt samengevat in de volgende paragrafen.

Een schets van twee gekoppelde NCLs is getoond in [Fig. 16.4](#), waarbij de lussen verticaal aangrenzende. Bovendien energie in het systeem wordt vertegenwoordigd door een horizontaal gedeelte onder de onderste primaire lus en energie verwerping door een horizontaal gedeelte aan de bovenkant van de secundaire lus. Een horizontale HEX gedeelte tussen de lussen vormt de thermische koppeling. De figuur geeft aan dat verzegelende zijn bevestigd aan elke lus voor drukregeling. Lekkage paden en andere fysieke domein apparatuur, zijn niet inbegrepen.



Figuur 16.4.
Twee verticale gekoppelde natuurlijke circulatie loops.

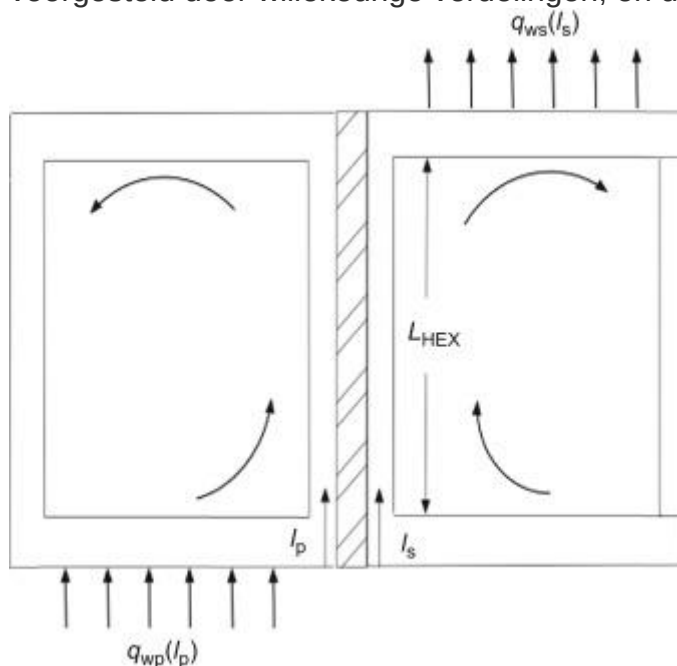
Een systeem dat is gebaseerd op NC stromen door de reactorkern heeft NC stroom aan de secundaire zijde van de SG is in feite twee gekoppelde NCLs. De secundaire lus is het vloeistofsysteem aan de secundaire zijde van de SG, en de uiteindelijke energieput dat ringetje de condensor stroomafwaarts van de turbines. Natuurlijk, de turbines ook energie verwijderen uit die fluidumstroom. De SG lus doorstroomopening de extractiestap wordt de damp en de injectie wordt de terugkeer van het condensaat naar de secundaire zijde van de SG.

De schets in [Fig. 16.4](#) geeft de klok stroom in de hete primaire kringloop en de koele secundaire lus. Deze opstelling geeft tegenstroom in BCs en koppeling HEXs. Merk op dat er vier even waarschijnlijk regeling van de stroming in de lussen van de in de figuur getoonde systeem: met de klok mee of tegen de klok in elke lus.

Een analyse van NCLs vereist dat de ruimtelijke verdelingen van de toestand van de vloeistof rond de lussen bekend. Dus elke stroomrichting overeenkomst moet worden verwerkt in de ontwikkeling van de modelvergelijkingen en de bijbehorende oplossingen. NCLs zoals getoond in [Fig. 16.4](#) zal werken in beide richtingen. Goed gemonteerd extra energie optellen en afstoting kan worden gebruikt om de stroomrichtingen bij steady-state omstandigheden te waarborgen.

De temperatuurverdeling in de vloeistoffen voor de HEX BCs is ook vereist. Dus de inlaat- en uitlaateinden van de bron en wastafel HEXs worden gespecificeerd. Schets geeft tegenstroom in de begrenzing HEXs. De vloeistof temperatuur bij de inlaat van de energiebron en wastafel worden gespecificeerd en kan een functie van tijd.

Een andere opstelling is getoond in [Fig. 16.5](#), die een horizontale energie toevoeging aan de onderkant van de linker primaire kringloop, een verticale HEX koppelen van de lussen en energie afstoting bij een horizontale doorsnede boven aan de rechterzijde secundaire lus toont. De energiebron en wastafel worden voorgesteld door willekeurige verdelingen, en deze kunnen ook tijdsafhankelijk zijn.



Figuur 16.5.

Twee horizontale gekoppelde natuurlijke circulatie loops.

Indien instabiliteit resulteert in omgekeerde stroomrichting in één of beide van de lussen, wordt de verdeling van de werkende vloeistof moet rekening houden met de nieuwe afstemmingen. Accounting voor alle mogelijke combinaties van stroomrichtingen in de lussen en BC HEXs leidt tot een groot aantal mogelijkheden, en deze kunnen niet alle worden meegenomen in een enkel systeem voor modelvergelijkingen.

In het algemeen kunnen de afmetingen van de verschillende lussen en variabele rond de lussen. Bijvoorbeeld, in [figuur 16.4](#) ; [Figuur 16.5](#) , hoewel de horizontale en verticale afmetingen getoond enigszins symmetrisch te zijn, dat is geen vereiste. Alle dimensies van beide lussen en al HEXs kunnen verschillen. Zo zal een kernreactor algemeen verscheidene stroming area veranderingen in de primaire en secundaire lussen omvatten. Constante dwarsdoorsnede stroomoppervlak is aangenomen. Deze vereenvoudiging wordt alleen aangebracht op de vergelijking verwerkingsgemak en op eenvoudige wijze kan worden opgenomen.

Het model is gebaseerd op de aanpassing van de vergelijkingen in de voorgaande sectie om de gekoppelde lussen case. De modelvergelijkingen hierin ontwikkeld wordt geschreven in het geval van eenfasige stroming in de primaire en secundaire lussen. Zowel steady-state en de normaal overgangstoestanden in Gen IV nucleaire reactor geval omvatten tweefasenfluidum toestanden. Safety-grade analyses van het ontwerp en de off-normale staten zal in het algemeen worden behandeld door systemen-analyse modellen en codes die gemakkelijk gegeneraliseerd geometrie, vloeiende staten, en stroomrichtingen tegemoet te komen.

Opgave van behoud van massa voor eendimensionale stroming

vergelijking[16.26]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho A_f + \frac{\partial}{\partial l} \rho u A_f = 0$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij l meet de afstand langs een lus. Integratie rond de hete primaire lus voor het geval dat er lekkage zou kunnen zijn van de lus geeft

vergelijking[16.27]

$$\frac{d}{dt} M = w_{lpin} - w_{lpout}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij w_{lp} is een lekstroom van de primaire kringloop of doorstroming zoals bij aftap uit een SG en condensaatretoursysteem terug in de lus. Als deze massastromen gelijk, dan [Vgl. \[16.27\]](#) geeft aan dat de massa van vloeistof in de lus constant. Als u de massa en energie-inhoud van een lus te behouden opent aanzienlijk potentieel voor het falen van de natuurlijke circulatie in stand te houden. Vooral vochtverlies zonder de mogelijkheid van het aanvullen van de verliezen zal zeer waarschijnlijk leiden tot falen van de werking van het systeem te voltooien. In een algemeen geval zouden de lekstromen zijn functies van tijd.

Wanneer de damp afname en invoer condensaat gelijk en variëren niet in de tijd, de massa in de hete primaire lus constant. Dezelfde overwegingen gelden voor de secundaire lus wanneer het operationeel is. Evenzo toepassing van de overwegingen van de energiebesparing modellen voor beide lussen blijkt dat de energie-inhoud verandert wanneer de extractie en injectie niet gelijk. De in de

volgende uitgevoerde ontwikkelingen zullen geen rekening met het algemene geval van verlies van vocht uit de systemen.

Als er geen verlies van vocht, dan het gewichtsgehalte altijd constant en [Eq. \[16.26\]](#) geeft vergelijking[16.28]

$$\frac{d}{dl} W = 0$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Toepassing op elke lus geeft $W_p = W_p(t)$ en $w_s = W_s(t)$. Voor stationaire omstandigheden, $W_p = W_{PSS}$ en $W_s = W_{SSS}$.

Bij gebrek aan extractie en herinjectie, de massastroom rond de lus is een functie van de tijd staan overal constant. Als de extractie en herinjectie aanwezig zijn, wordt de massastroomsnelheid varieert met de tijd en ruimte langs de stroombanen kan de massa en energie-inhoud verandert als functie van de tijd en de bewerking als NCL vernietigd. Als de SG bewerking wordt gemodelleerd, wordt de stroom constant, maar verschillend in verschillende delen van het systeem: de totale stroom voor die delen die de energiebron en een verminderde stroom stroomafwaarts van de afnameplaats omvatten. Indien de stroomstroom is w_{STMP} en de stroming door de energiebron in de primaire lus W_p , wordt de stroom stroomafwaarts van de stroom winplaats is $W_p - w_{STMP}$.

Een eendimensionale van de impulsbalans vergelijking voor technische toepassingen in flow netwerken en ontworpen apparatuur ([Todreas en Kazimi, 1990](#))

vergelijking[16.29]

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{W}{A_f} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{W^2}{\rho A_f^2} = -\frac{\partial}{\partial l} P - K_{wf} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} - K_{\parallel} \frac{1}{2} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} \delta(z - z_{\parallel}) - \rho g \cos \theta$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij θ de hoek tussen de stroomrichting en het verticaal omhoog positieve z - as, $\delta(z - z_{\parallel})$ is de Dirac-delta-functie en ρ_0 is de referentiedichtheid gebruikt in de EoS.

Het momentum balans model voor de NCLs in [figuur 16.4](#) ; [Figuur 16.5](#) wordt verkregen door integratie van [vergelijking. \[16.29\]](#) rond een lus te krijgen vergelijking[16.30]

$$\frac{L_{tp}}{A_{fp}} \frac{\partial}{\partial t} W_p = \oint_{L_{tp}} g \rho_p(T_p) \cos \theta_p dl_p - R_{wfp}(W_p) \frac{W_p |W_p|}{\rho_{0p} A_{fp}^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor het primaire hete lus en

vergelijking[16.31]

$$\frac{L_{ts}}{A_{fs}} \frac{\partial}{\partial t} W_s = \oint_{L_{ts}} g \rho_s(T_s) \cos \theta_s dl_s - R_{wfs}(W_s) \frac{W_s |W_s|}{\rho_{0s} A_{fs}^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

de secundaire koele lus.

De lus stromingsweerstand, de laatste term aan de rechterzijde van [\[16.30\]](#) ; [\[16.31\]](#) , is

vergelijking[16,32]

$$R_{wf}(\cdot) = \left[\frac{1}{8} \bar{A}_{wf} f_{wf} L_t + \frac{1}{2} \sum_j K_{jII} \right]$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij $R_{wf}(\cdot)$ betreft een functie van de respectievelijke massastroomsnelheden en de geometrische gegevens van de lus. De eerste bijdrage in [Eq. \[16.32\]](#) komt door gedistribueerde wandwrijving en de tweede is vanwege lokale irreversibele verliezen bij locatie j .

Voor het geval stoom extractie en injectie [Eq. \[16.30\]](#) verkrijgt uit de injectieplaats naar de winplaats en

$$\frac{L_{tp}}{A_{tp}} \frac{\partial}{\partial t} (W_p - w_{stmp}) = \oint_{L_{tp}} g \rho_p (T_p) \cos \theta_p dl_p - R_{wf} (W_p - w_{stmp}) \frac{(W_p - w_{stmp}) |W_p - w_{stmp}|}{\rho_{0p} A_{tp}^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

bezit van de winplaats naar de injectieplaats. Een modelvergelijking voor het verlies van vloeistof, een impulsbalans bijvoorbeeld nodig voor w_{SMTP} .

Merk op dat de integratie volledig rond de lus uitgemiddeld alle ruimtelijke locaties van de drukgradiënten vanwege gedistribueerde wandwrijving en typisch verliezen en veranderingen in stroomoppervlak. De laatste worden vertegenwoordigd door de tweede term aan de linkerkant van [verg. \[16.29\]](#).

De muur tot fluïdum wrijvingsfactor kan worden weergegeven in een algemene vorm van

vergelijking[16.34]

$$f_{wf} = C_{wf} / Re_m$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij het Reynoldsgetal

vergelijking[16,35]

$$Re = \frac{W D_{hy}}{A_f \mu}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Voor afvalwater convectiestromen in ronde buizen, de gebruikelijke waarden $C_{wf} = 64,0$ en $m = 1$ voor laminaire stroming, $C_{wf} = 0,3164$ en $m = 0,25$ voor lagere waarden van het Reynoldsgetal ($Re < 10^5$) en $C_{wf} = 0.184$ en $m = 0,20$ voor hoge Reynoldsgetal volle turbulente stroming.

De specifieke vorm van de verdeelde wand wrijvingsfactor, [vgl. \[16.34\]](#), natuurlijke circulatie stromen, is het onderwerp van uitgebreid onderzoek geweest. [Todreas en Kazimi \(1990\)](#) geven een samenvatting die tijd, waaronder stang bundel data door [Gruszynski en Viskanta \(1983\)](#). [Swapnalee en Vijayan \(2011\)](#) en [Ambrosini et al. \(2004\)](#) zijn meer voorbeelden. De speciale aandacht die nodig is voor superkritische thermodynamische staten is eerder in dit hoofdstuk voordoen (zoals, [Pioro en Duffey 2003](#); [Yadav et al, 2012b](#)). Natuurlijke circulatie stromen heeft bulk bewegingen, enigszins verschillend van natuurlijke convectie en lage stroom geforceerde convectie. De noodzaak voor een continue weergave van de

wrijvingsfactor van wand gedistribueerde weerstand Door een extra aspect van de stabiliteit van NCLs zoals besproken in [sectie 16.10](#) .

$\overline{A}_{wf}$ is het wandoppervlak per eenheid vloeistofvolume voor remvoeringen
vergelijking[16.36]

$$\overline{A}_{wf} = \frac{A_{wf}}{V} = \frac{p_w l}{A_f l} = \frac{4}{D_{hy}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij p_w is de natte omtrek en l is een toename van lengte in de stromingsrichting. Plaatselijke irreversibele verliezen zijn opgenomen in de stromingsweerstand model alleen voor de volledigheid; deze zullen niet verder in dit hoofdstuk worden beschouwd. De numerieke waarde van de lokale verliesfactor afhankelijk van de geometrie van het stromingskanaal ter plaatse van de schade. De problemen geassocieerd met de juiste en nauwkeurige weergave van de wand stromingsweerstand, zowel gedistribueerde en lokale, zijn niet in deze toelichting gericht; deze zijn in detail in de literatuur.

Merk op dat hoewel de stromingsweerstand heeft in algemene zin is weergegeven op het geval van omgekeerde stroom gaan, is niet altijd door via de ontwikkeling van de modelvergelijkingen uitgevoerd. In het algemeen, tenzij anders vermeld, deze aantekeningen gaan ervan uit dat de stroom niet van richting verandert. Dat wil zeggen, oscillerende bewegingen ongeveer nul hoeven niet noodzakelijkerwijs in. Zoals vermeld in de inleiding, moet de energieverdeling rond de lussen vertegenwoordigen de stroomrichting.

De lus stromingsweerstand is gespecialiseerd om de zaken die in dit hoofdstuk als volgt worden beschouwd. De plaatselijke irreversibele verliezen worden verwaarloosd, met name om te besparen op vergelijking verwerking. De gedistribueerde wand wrijvingsfactor correlatie formulering wordt beschouwd in het volgende.

Voor laminaire stroming, [\[16.32\]](#) , [\[16.34\]](#) ; [\[16.35\]](#) geven
vergelijking[16.37]

$$R_{wf} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{D_{hy}} \frac{C_{wf,lam}}{Re} \frac{W^2}{\rho_0 A_f^2} L_t = \frac{1}{2} \frac{L_t}{D_{hy}} C_{wf,lam} Re \frac{\mu^2}{\rho_0 D_{hy}^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Voor constante wall wrijving factor in de turbulente stroming regime

vergelijking[16.38]

$$R_{wf} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} = \frac{1}{2} \frac{L_t}{D_{hy}} C_{wf,tur} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} = \frac{1}{2} \frac{L_t}{D_{hy}} C_{wf,tur} Re^2 \frac{\mu^2}{\rho_0 D_{hy}^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Voor de algemene formulering voor turbulente stroming, [vgl. \[16.34\]](#) geeft
bijvoorbeeld

vergelijking[16.39]

$$R_{wf} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} = \frac{1}{2} \frac{L_t}{D_{hy}} \frac{C_{wf,tur}}{Re^m} \frac{W|W|}{\rho_0 A_f^2} = \frac{1}{2} \frac{L_t}{D_{hy}} \frac{C_{wf,tur}}{Re^m} Re^2 \frac{\mu^2}{\rho_0 D_{hy}^2}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

De representatie van gedistribueerde wandwrijving alle regimes van laminaire stroming volledig turbulent is vereist wiskundig continu beschouwd. Wordt hieraan niet voldaan dan kunstmatige vormen van instabiliteit kan worden ingebracht; alle discontinuïteiten aanwezig potentieel voor de invoering van instabiliteit. Voldoend lage stroomsnelheden, kunnen de veranderingen in de vloeistofviscositeit de temperatuursveranderingen door de lus laminaire en turbulente stroming wrijving regimes voeren.

Energiebesparing modelvergelijkingen zijn vereist voor alle segmenten van de primaire en secundaire lussen. Deze segmenten zijn (1) de energietoevoer segment in de primaire kringloop (2) onverwarmd horizontale en stijgende segmenten van beide lussen, (3) het koppelen HEX segment (4) onverwarmd dalende segmenten voor beide lussen en (5) het energie afstoting HEX segment in de secundaire lus. Algemene formuleringen van de modelvergelijkingen zijn eerst gegeven in de volgende paragrafen.

De energiebesparing modelvergelijkingen zijn geschreven voor de stromingsrichtingen getoond in [Fig. 16.4](#) . Om te besparen op de vergelijking verwerking wordt bij verlies en injecteren van fluïdum van / naar de lussen niet in detail onderzocht. De situatie zoals geschetst voor massabehoudsvergelijking bezit door directe analogie. Merk op dat nettoverlies, zonder vervanging van massa en energie van beide lus kan leiden tot situaties waarin de beoogde natuurlijke circulatie niet aanwezig zal zijn.

De energiebalans modellen voor de primaire lus

vergelijking[16,40]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_p + \frac{W_p}{A_{fp} \rho_{p0}} \frac{\partial}{\partial l_p} T_p = \frac{p_{whp} q''_{wp}}{A_{fp} \rho_{p0} C_{pp}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

het segment van de hete primaire kringloop energievoorziening, waarbij p_{whp} de verwarmde omtrek van de wand van de HEX en q''_{wp} is de wand warmteflux vanuit de energiebron HEX de primaire kringloop. De wand warmtestroom wordt bepaald door de stroomopstelling en de grens temperaturen voor de energievoorziening HEX of de temporele en ruimtelijke verdeling van de interne energiebron naar de primaire kringloop.

De energiebesparing model voor de onverwarmde horizontale en stijgende segment van de primaire lus verantwoordelijk voor het potentieel voor energie-uitwisseling tussen de vloeistof en de wand tijdens transiënten is

vergelijking[16.41]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_p + \frac{W_p}{A_{fp} \rho_{p0}} \frac{\partial}{\partial l_p} T_p = \frac{p_{whp} h_{cwp}}{A_{fp} \rho_{p0} C_{pp}} (T_{whp} - T_p)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Bij steady state de rechterzijde nul.

Voor de primaire zijde van de koppeling HEX de temperatuurgradiënt in het fluïdum negatief,

vergelijking[16,42]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_p + \frac{W_p}{A_{fp} \rho_{p0}} \frac{\partial}{\partial l_p} T_p = \frac{U_{cHEX} p_{whp}}{A_{fp} \rho_{p0} C_{pp}} (T_s - T_p)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en

vergelijking[16,43]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_p + \frac{W_p}{A_{fp} \rho_{p0}} \frac{\partial}{\partial l_p} T_p = \frac{p_{whp} h_{cwp}}{A_{fp} \rho_{p0} C_{pp}} (T_{wcp} - T_p)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

de onverwarmde horizontale en dalende delen van de primaire kringloop langs de koppeling HEX, opnieuw waardoor energie-uitwisseling tussen het fluïdum en de muur.

Gebruik een nuldimensionale hoop gegooide benadering voor warmtewisseling tussen het fluïdum en de wand van de niet-HEX segmenten,

vergelijking[16,44]

$$\frac{d}{dt} T_{whp} = \frac{p_{whp} h_{cwhp}}{M_{whp} C_{pwhp}} (T_p - T_{whp})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

de hete delen van de primaire lus en

vergelijking[16,45]

$$\frac{d}{dt} T_{wcp} = \frac{p_{whp} h_{cwp}}{M_{wcp} C_{pwcp}} (T_p - T_{wcp})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor de koude segmenten van de primaire kringloop. De nuldimensionale modelleren verwaarloost de variatie van de wandtemperatuur langs de stroomrichting.

De voorbijgaande reactie van de muur materialen in de energiebron HEX is

vergelijking[16,46]

$$\frac{d}{dt} T_{wpHEX} = \frac{p_{wo} q''_o}{M_{wpHEX} C_{pwpHEX}} - \frac{p_{wi} q''_i}{M_{wpHEX} C_{pwpHEX}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

De overgangsresponsie van de wand in de koppeling HEX wordt gegeven door

vergelijking[16,47]

$$\frac{d}{dt} T_{wcHEX} = \frac{p_{wo} q''_o}{M_{wcHEX} C_{pwcHEX}} - \frac{p_{wi} q''_i}{M_{wcHEX} C_{pwcHEX}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

De noemers van [\[16,46\]](#) ; [\[16,47\]](#) vertegenwoordigen de thermische massa van het metaal in de respectievelijke HEX.

Bij steady-state omstandigheden, wordt de temperatuurverdeling in de energiebron en de koppeling HEX verkregen door integratie [\[16,40\]](#) ; [\[16,42\]](#) langs de stromingsbaan in deze inrichtingen. De modellen voor de verschillende energievoorziening methoden, [Eq. \[16,40\]](#) , worden in deze toelichting.

De bijbehorende modelvergelijkingen voor de koele secundaire lus

vergelijking[16.48]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_s - \frac{W_s}{A_{fs}\rho_{s0}} \frac{\partial}{\partial l_s} T_s = \frac{U_{cHEX}P_{whs}}{A_{fs}\rho_{s0}C_{ps}} (T_p - T_s)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor de koppeling HEX, waarbij de temperatuurgradiënt in het fluïdum in de stromingsrichting positief. Merk op dat in de koppeling HEX de afstand coördinaten gelijk. Een energiebalans model voor de horizontale en de stijgende warme zijde van de niet verwarmde segmenten van de secundaire lus

vergelijking[16.49]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_s + \frac{W_s}{A_{fs}\rho_{s0}} \frac{\partial}{\partial l_s} T_s = \frac{p_{whs}h_{cws}}{A_{fs}\rho_{s0}C_{ps}} (T_{whs} - T_s)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en

vergelijking[16.50]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_s + \frac{W_s}{A_{fs}\rho_{s0}} \frac{\partial}{\partial l_s} T_s = \frac{\overline{A}_{whs}q''_{ws}}{\rho_{s0}C_{ps}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor de energie wastafel in de koele secundaire lus en

vergelijking[16.51]

$$\frac{\partial}{\partial t} T_s + \frac{W_s}{A_{fs}\rho_{s0}} \frac{\partial}{\partial l_s} T_s = \frac{p_{whs}h_{cws}}{A_{fs}\rho_{s0}C_{ps}} (T_{wcs} - T_s)$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor de dalende koelere vloeistof in de onverwarmde segmenten van de secundaire lus. De koppeling HEX geeft de fysische en mathematische koppeling tussen de primaire en secundaire lussen.

De overgangsresponsie van de wandmaterialen wanneer gemodelleerd als nuldimensionale geconcentreerde parameter benadering is nuttig wanneer het fluïdum in de respectieve segmenten ook gemodelleerd op nul-dimensionale basis. Bij het modelleren van een volledig systeem in detail zal geleiding in de omgevende materialen vaak worden verondersteld eendimensionale en een aan een met fluïdum control volumes.

Indien bij een kokend tweefasige loop nuldimensionale hoop gegooïd modellen gebruikt voor de diverse kokende toestand gebieden, dan is de thermische responsie van het wandmateriaal direct worden beschouwd.

Een aanname die veelvuldig bij sterk geïdealiseerde model is dat de energie afwijzing door de secundaire lus als een constante warmteflux kan worden uitgevoerd en is gelijk aan de energiebron. In het algemeen is dat niet mogelijk is om direct te regelen in het fysieke domein. Lichte generalisaties, die in het volgende zal worden ontwikkeld, leiden tot meer fysiek realistische voorstellingen.

BCS het vergelijkingssysteem, in het algemene geval beschouwd [Fig. 16.4](#) , worden gegeven door de inlaattemperatuur aan het hete einde van de energievoorziening

HEX, T_{hin} en de inlaattemperatuur aan het koude einde van de energieput HEX, T_{cin} . In het algemene geval kunnen deze BCs worden genomen om de functies van de tijd zijn om introducties van verstoringen in de BCS mogelijk te maken. De steady-state prestatie van de gekoppelde lussen wordt bepaald door de totale thermische conductantie van T_{hin} tot T_{cin} . Analyses van geïdealiseerde NCL systemen zijn soms rechtstreeks gebaseerd op specificatie van de bron en wastafel temperatuurverschil. Anderen zijn gebaseerd op de specificatie van constante bron en koellichaam aan één zijde van de HEX BCS. Minder algemene analyses zijn gebaseerd op de specificatie van de energievoorziening van de primaire lus, [vgl. \[16,40\]](#) en de overeenkomstige energieput op de secundaire lus, [vgl. \[16,50\]](#).

Het fluïdum in beide lussen wordt genomen thermisch uitzetbaar te zijn en de dichtheid van een lineaire functie van alleen de temperatuur, zoals in het enkelvoudig geval, [vgl. \[16,13\]](#). Specifieke aspecten van de energiebron en wastafel worden beschouwd in de volgende paragrafen.

De warmteflux aan de rechterkant van [verg. \[16,40\]](#) voor de primaire kringloop energietoevoer kan worden genomen constant zijn, [vergelijking\[16.52\]](#)

$$q''_{\text{wp}} = q''_{0\text{wp}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

wat een algemeen BC analyses geïdealiseerde enkele NCLs of afhankelijk van de plaats binnen de energiebron inrichting [vergelijking\[16,53\]](#)

$$q''_{\text{wp}} = q''_{\text{wp}}(l_{\text{p}}) \quad (L_{\text{pHEXi}} \leq l_{\text{p}} \leq L_{\text{pHEXo}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij de verdeling aan de rechterkant van [verg. \[16,53\]](#) kan expliciet worden gespecificeerd voor elke fysieke toestand. Het steady-state axiale warmtefluxverdeling in een reactorkern is een voorbeeld. De energiebron kan ook worden gemodelleerd met behulp van een warmte-overdrachtscoëfficiënt en een gespecificeerde temperatuur voor de energiebron [vergelijking\[16.54\]](#)

$$q''_{\text{wp}} = h_{\text{cpsrc}}(T_{\text{psrc}} - T_{\text{p}}) \quad (L_{\text{pHEXi}} \leq l_{\text{p}} \leq L_{\text{pHEXo}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij h_{cpsrc} is de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de primaire kringloop energiebron en T_{psrc} de gespecificeerde temperatuur voor de energiebron. Elk van deze geeft verschillende verdelingen van de primaire lus vloeistoftemperatuur in de energiebron segment. De grenzen van de plaats in de hete primaire kringloop overeenkomen met de inlaat- en uitlaatzijde van de energiebron HEX segment. Voor deze idealisering de opgegeven kwaliteit kan ook worden genomen om een functie van de tijd, zodat de effecten van verstoringen van de energievoorziening op het ontstaan van instabiliteit kan worden onderzocht. De energiebron kan worden gemodelleerd door een HEX zoals getoond in [Fig. 16.3](#). Dit model is niet in detail aan bod in deze toelichting. Het modelleren van de koppeling HEX gegeven in deze toelichting, gebruik [\[16,42\]](#) ; [\[16,48\]](#), kunnen worden aangepast aan deze situatie te voorzien.

Niet alle mogelijke representaties van de energievoorziening in detail zal worden behandeld. De constante energiebron en constante energievoorziening temperatuur modellen ontwikkeld in het volgende.

Als de primaire kringloop energiebron warmteflux constant, dan [Vgl. \[16.40\]](#) geeft de verdeling

vergelijking[16,55]

$$T_{\text{pss}}(l_p) = T_{\text{cpss}} + q''_{0\text{wp}} \frac{P_{\text{whp}}}{W_{\text{pss}} C_{\text{pp}}} l_p \quad (L_{\text{pHEXi}} \leq l_p \leq L_{\text{pHEXo}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en de uitlaattemperatuur

vergelijking[16.56]

$$T_{\text{hpss}} = T_{\text{cpss}} + q''_{0\text{wp}} \frac{A_{\text{whpsrc}}}{W_{\text{pss}} C_{\text{pp}}} \quad (l_p = L_{\text{pHEXo}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij A_{whpsrc} is het totale wandoppervlak van warmteoverdracht van de hete loop primaire energiebron en T_{cpss} de primaire lus vloeistoftemperatuur bij de inlaat van het toevoegen van energie segment. Deze laatste hoeveelheid is een gevolg van de uitvoering van de gekoppelde lussen.

De rechterzijde van deze kan worden geschreven in termen van de totale sterktetoename in de vloeistof,

vergelijking[16.57]

$$Q_{\text{src}} = q''_{0\text{wp}} A_{\text{whpsrc}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Wanneer de energiebron wordt weergegeven door [vergelijking. \[16.54\]](#) ,

vervolgens [Vgl. \[16.40\]](#) wordt

vergelijking[16,58]

$$\frac{d}{dl_p} T_{\text{pss}} = \frac{P_{\text{whp}}}{W_{\text{pss}} C_{\text{pp}}} h_{\text{cpsrc}} (T_{\text{psrc}} - T_{\text{pss}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en, met T_{psrc} constant, integratie geeft

vergelijking[16,59]

$$T_{\text{pss}}(l_p) = T_{\text{psrc}} - (T_{\text{psrc}} - T_{\text{cpss}}) e^{-\frac{h_{\text{cpsrc}} P_{\text{whp}}}{W_{\text{pss}} C_{\text{pp}}} (l_p - L_{\text{pHEXi}})} \quad (L_{\text{pHEXi}} \leq l_p \leq L_{\text{pHEXo}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en de hoge temperatuur van de primaire lus aan de uitgang van de energievoorziening segment

vergelijking[16,60]

$$T_{\text{hpss}} = T_{\text{psrc}} - (T_{\text{psrc}} - T_{\text{cpss}}) e^{-\frac{h_{\text{cpsrc}} A_{\text{whpsrc}}}{W_{\text{pss}} C_{\text{pp}}}} \quad (l_p = L_{\text{pHEXo}})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

Zoals in het geval van de enkele NCL eerder beschouwd, kan de exponent worden geschreven in termen van de Stanton aantal.

De energiebalans modellen voor de koppeling HEX gekoppeld en moeten samen worden opgelost. De energie vergelijking voor de primaire zijde fluïdum, [vgl. \[16,42\]](#) , voor de constante toestand

$$\frac{\partial}{\partial l_p} T_{pss} = \frac{U_{cHEX} P_{whp}}{W_{pss} C_{pp}} (T_{sss} - T_{pss})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

en [Eq. \[16.48\]](#) de secundaire zijde fluïdum

$$\frac{\partial}{\partial l_p} T_{sss} = - \frac{U_{cHEX} P_{whs}}{W_{sss} C_{ps}} (T_{pss} - T_{sss})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

wanneer beide van toepassing in de segmenten toegewezen aan de koppeling HEX, die wordt aangeduid met Chex in de subscripts. In de koppeling HEX de coördinaten gelijk zijn.

De energiebalans voor het primaire fluïdumstroom door de koppeling is HEX

$$q''_{0wp} = W_{pss} C_{pp} (T_{cpss} - T_{hpss})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

dat is geschreven als een afname van het energiegehalte van het primaire fluïdum. Voor de secundaire vloeistofstroom

$$q''_{0wp} = W_{sss} C_{ps} (T_{hsss} - T_{csss})$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

De oplossingen voor de temperatuur en de temperatuur verschil distributies zijn eenvoudig, maar zijn hier niet inbegrepen. [Rao et al, 2005d.](#) ; [Rao et al., 2008](#) en [Sabharwall et al. \(2012\)](#) hebben de oplossingen in detail uitgewerkt. Als HEXs worden gebruikt om energie toe te voegen in de primaire kringloop en onttrekken warmte aan de secundaire vloeistof, dan is de modellering is analoog aan die toegepast voor de koppeling HEX.

De energieput op de secundaire lus kan worden gemodelleerd op drie manieren: (1) een constante sink analoog aan de energiebron in de primaire kringloop (2) met een warmte-overdrachtscoëfficiënt en constante gespecificeerde koellichaam of (3) een HEX, weer analoog aan het modelleren van de energievoorziening in de primaire kringloop.

Als de warmteflux aan de rechterkant van [verg. \[16.50\]](#) is een constante, waarna de temperatuur bij de uitgang van de energieput is

vergelijking[16,65]

$$T_{csss} = T_{hsss} - q''_{0ws} \frac{A_{whssnk}}{W_{sss} C_{ps}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

waarbij A_{whssnk} de totale wand warmteoverdracht gebied voor de koele secundaire lus energieput.

Indien de energieput wordt vertegenwoordigd door het model overeenkomt met [Vgl. \[16.54\]](#) , vervolgens [Vgl. \[16.50\]](#) geeft de koele temperatuur van de secundaire lus aan de uitgang van de energie-afvoerinrichting, vergelijking[16.66]

$$T_{csss} = T_{ssnk} - (T_{ssnk} - T_{hsss})e^{-\frac{h_{cssnk} A_{whssnk}}{W_{ss} C_{ps}}}$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

De modelvergelijkingen ontwikkeld in deze secties worden hier samengevat voor toekomstig gebruik. Het steady-state vormen van het algemene model vergelijkingen die in de vorige paragraaf zijn ontwikkeld in de volgende paragrafen.

Voor het systeem in [Fig. 16.4](#) , alle energie-uitwisseling componenten horizontaal zodat de impulsbalans modellen [\[16.30\]](#) ; [\[16.31\]](#) , geïntegreerd om de lussen te vergelijking[16,67]

$$R_{wfp}(W_{pss}) \frac{W_{pss} |W_{pss}|}{\rho_{0p} A_{fp}^2} = g \rho_{0p} \beta_p (T(\bullet)_{hpss} - T(\bullet)_{cpss}) H_p$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor de warme primaire lus en vergelijking[16,68]

$$R_{wfs}(W_{sss}) \frac{W_{sss} |W_{sss}|}{\rho_{0s} A_{fs}^2} = g \rho_{0s} \beta (T(\bullet)_{hsss} - T(\bullet)_{csss}) H_s$$

[Schakel](#) [MathJax](#)[op](#)

voor de koude secundaire lus. De notatie $T(\bullet)$ betekent dat de temperatuur is een functie van $(W_{pss}, W_{sss}, T_{src}, T_{snk})$.

Voor het algemene geval van HEXs op de energiebron en wastafel, zijn er acht unknowns- $W_p, T_{ph}, T_{pc}, T_{src},$ de primaire kringloop en $W_s, T_{ps}, T_{ps}, T_{snko}$ -en acht vergelijkingen twee-impuls en energie balansen voor beide stromen in alle drie HEXs. Deze telling is de zuivere thermisch aangedreven hydrodynamische NCLs. Het aantal parameters behorende bij de hydrodynamische zaak ook erg groot, zelfs als de geometrie niet is inbegrepen. Het probleem wordt snel hardnekkig als modellering en antwoorden voor de vaste stoffen rondom de vloeistof en vereiste aanvullende realisms, inbegrepen. Het is duidelijk dat de analytische oplossingen zeer moeilijk te verkrijgen zal zijn en dat mogelijk zou zijn, of helemaal niet, slechts onder zeer bijzondere omstandigheden. [Salazar et al. \(1988\)](#) en [Wu \(2011\)](#) hebben zeer geïdealiseerde voorstellingen van gekoppelde NCLs gegeven.

De natuurlijke beroep voor deze situatie is numerieke oplossingsmethoden voor zowel steady-state en transiënte analyses gebruiken. De systemen analyse codes die worden gebruikt voor ontwerp en veiligheidsstudies kunnen allemaal aan gekoppelde NCL case. Tegelijkertijd worden lokale speciaal- en general-purpose natuurlijke circulatie modellen, methoden en codes worden ontwikkeld voor toepassingen tot Gen IV reactor concepten.

Gezien de complexiteit van gekoppelde NCL systemen, met name voor het bedienen reactorontwerp, het omzeilen van de gebruikelijke frequentiedomein geanalyseerd en direct naar tijdsdomein analyses zal blijken efficiënt. Gedetailleerde beschrijvingen

van de systemen, samen met analyses in de tijd domein, zal uiteindelijk nodig zijn; Daarom starten van de benodigde inspanning is een goed idee. Het literatuuronderzoek eerder duidelijk gegeven geeft aan dat de validering van veel systemen-analyse modellen en codes voor toepassingen om Gen IV machines is in volle gang.

16.12. conclusies

De literatuurstudie geeft aan dat de validatie van de modellen en codes die waarschijnlijk zal worden gebruikt voor de exploratie en licenties is een top focus. Gegeneraliseerde frequentie en tijd domein codes zijn direct beschikbaar. Er zijn overvloedig fundamentele experimentele gegevens voor het begin van instabiliteiten in eenvoudige kanalen zoals enkel- en evenwijdige buizen en simpele NCLs. Experimentele faciliteiten voor kritische aspecten van specifieke Gen IV ontwerpen zullen waarschijnlijk evolueren als R & D blijft. Er lijkt wereldwijde coördinatie, samenwerking en samenwerking.

Nomenclatuur

EEN	Oppervlakte, m^2
$\overline{A}$	Oppervlak per eenheid vloeistofvolume, $1 / m$
A_f	Flow oppervlakte, m^2
C_p	Soortelijke warmte bij constante druk, $J / kg K$
D	Diameter m
D_{hij}	Verwarmd equivalente diameter, m
D_{hy}	Bevochtigde equivalente diameter, m
f_w	Wrijvingsfactor
g	Gravitationele kracht lichaam, $kg m / s^2$
G	Massaflux, $kg / m^2 s$
h	Enthalpie, J / kg
h_c	Warmteoverdrachtscoëfficiënt, $W / m^2 K$
h_g	Dampfase enthalpie, J / kg
h_{fg}	Verdampingsenthalpie, J / kg
h_l	Vloeistoffase enthalpie, J / kg
H	Verticale afstand m
K_{II}	Lokale drukverlies factor
l	Afstand langs lus, m
L	Horizontale lengte, m
M	Massa kg
N_{pch}	Phase change number
N_{sub}	onderkoeling nummer
p	Perimeter, m
q''_w	Wall warmteflux, W / m^2
Q	Power, W
R_w	Stromingsweerstand factor
t	Time, s
u	Snelheid, m / s
U	Overall warmteoverdracht factor, $W / m^2 K$
V	Fluïdumvolume, m^3

V_{sl}	Slipsnelheid, m / s
w	Massastroomsnelheid, kg / s
$\bar{X}^{in}$	massagehalte
z	Asrichting, m

[tabelopties](#)

Griekse symbolen

α	void fractie
β	Thermische, 1 / K expansie
δ	Dirac-delta-functie
μ	Dynamische viscositeit, Pa.s
ρ	Dichtheid, kg / m ³
ν	Kinematische viscositeit, m ² / s

[tabelopties](#)

dimensieloze getallen

Gr	$\frac{g\beta\Delta TD_{hc}^3}{\nu^2}$ Grashof Number,
Opnieuw	$\frac{WD_{hy}}{A_f\mu}$ Reynoldsgetal,
St	$\frac{h_c}{\rho u C_p}$ Getal van Stanton,

[tabelopties](#)

subscripts

c	Koel, afgekoeld koppeling
cp	Koele temperatuur primaire kringloop
cs	Koele temperatuur secundaire lus
ext	extern
g	Damp
gs	Verzadigde damptoestand
h	Heet, verwarmde
pK	Hoge temperatuur primaire kringloop
hs	Hoge temperatuur secundaire lus
hex	Warmtewisselaar
i, in	inham
int	intern
l	Vloeistof
lam	laminar
lgs	Verzadigde vloeistof en damp
ls	Verzadigde vloeibare toestand
0	Reference staat
O	Out, outlet
p	Primaire lus
pri	Primaire zijde van HEX
S	Secundaire lus

sec	Secundaire zijde van HEX
snk	Wastafel
src	Bron
ss	Stabiele toestand
t	Totale lengte
tur	woelig
w	Wall, bevochtigd
wh	Muur hitte
wf	wandwrijving

[tabelopties](#)

Acroniemen en afkortingen

ALARA	Als laag als redelijkerwijs mogelijk
Aoos	Verwachte Operationele Voorkomen
AR	geavanceerde Reactors
ZOALS IK	American Society of Mechanical Engineers
ASTRID	Geavanceerde Natrium Technologische Reactor for Industrial Demonstratie
ATHLET	Analyse van Thermohydraulica lekken en Transients
ATWS	Verwachte Transients Zonder Scram
BCS	randvoorwaarden
BDBA	Beyond-Design-Basis Ongevallen
BHWR	Boiling Heavy Water Reactor
BIMAC	Kelder Interne Melt arrestatie en koelbaarheid (Device)
BORAX	Kokend water Reactor eXperiment
BWR	Kokendwaterreactoren
CAPWR	Chinese Advance drukwaterreactor
CATHARE	Code voor de Analyse van THERmalhydraulics bij een ongeval van Veiligheid van reactors en Evaluatie
CATHENA	Canadees Algoritme voor THERmalhydraulic Network Analysis
CDF	Cumulatief Schade Functie
CDF	Core Damage Frequenties
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHF	Kritische Heat Flux
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
COL	Gecombineerde exploitatievergunning
DA	deterministische Analyses
DBA	Ontwerp Basis Ongevallen
DBT's	Ontwerp Basis Bedreigingen
DHR	Nakoelstrang
Deed	Defense in Depth
DNB	Vertrek uit kiemkoken
DPV	drukverlaging Valve
EBR	Experimental Breeder Reactor
EBWR	Experimentele Boiling Water Reactor
EPRI	Electric Power Research Institute
ESBWR	Economische Simplified Boiling Water Reactor
Eos	Vergelijking van State

FHRS	Fluoride zout gekoeld hogetemperatuurreactor
VUIST	Volledige hoogte Integral Simulation Test
Gen IV	generatie IV
GIF	Generation IV International Forum
HEX	Warmtewisselaar
HPLWR	High Performance Lichtwaterreactor
HRA	Human Reliability Analysis
HTGR	High-Temperature Gasgekoelde Reactor
HTTR	High Temperature Test Reactor
hz	Hertz
I & C	Instruments & Control
IAEA	IAEA Internationale Organisatie voor Atoomenergie
IC	isolatie condensor
ICs	Begincondities
IRWST	In-containment Tanken Water Storage Tank
ISAM	Integrated Safety Analyse Methodologie
LBLOCA	Groot-Break Verlies van koelvloeistof ongeval
LOBI	Lus Blowdown Investigation
LOCA	Verlies van koelvloeistof ongeval
ZOLDER	Vochtverlies Test
LRF	Grote release Frequency
LWR	Lichtwaterreactoren
MSFR	Gesmolten zout Fast Reactor
NC	natuurlijke circulatie
NCL	Natuurlijke circulatie Loop
NEI	Nuclear Energy Institute
NRTS	National Reactor Testing Station
OECD	Organisatie voor economische samenwerking en ontwikkeling
GDV	Gewone differentiaalvergelijkingen
OFI	Aanvang van Flow Instabiliteit
ONB	Aanvang van kiemkoken
oon	Begin van de kiemvorming
OSU-MASLWR	Oregon State University - Multi-Application Small Light Water
OSV	Aanvang van Significant Void
PBMR	Knikkercentrale
Pirt	Phenomena Identificatie en Ranking Table
PRA	Probabilistische risicobeoordeling
PRHRS	Passief Restwarmte Removal System
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PSB	Gedeeltelijke onderkoeld Boiling
PT	Pressure Tube
POEMA	Purdue University Multidimensional integrale testopstelling
PWR	Drukwaterreactor
QA	Kwaliteitsverzekering
R / A	Betrouwbaarheid / beschikbaarheid
R & D	Onderzoek & Ontwikkeling

REE	Zeldzame of Extreme Events
RELAP	Reactor Excursie en lekken Analysis Program
RETRAN	reactor voorbijgaande
ROSA-III	Rig Of Safety Assessment-III
ROSA-IV LSTF	Rig Of Safety Assessment-IV grootschalige testfaciliteit
RPV	Reaktordrukvat
Standaarden	ernstige ongevallen
SB	station Blackout
SCB	Volledig ontwikkeld onderkoeld Boiling
SBLOCA	Kleine-Break Verlies van koelvloeistof ongeval
SDC	Veiligheid Ontwerp Criteria
SFRS	Sodium Fast Reactors
SG	Stoomgenerator
RBE	Kleine, middelgrote en / of Modular Reactors
ZO	veiligheid doelstelling
Spert	Special Power Excursion Reactor Program Test
SPES	Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza
SRF	Kleine release Frequency
SRLs	Veiligheid referentieniveaus
SRV	Veiligheidsklep
SSC's	Structuren, systemen en componenten
TMI	Three Mile Island
TRAC	Transient Reactor Analysis Code
TRAC-B	Reactor transiënte analyse code-kokend water reactor
SPOOR	TRAC / RELAP Uitgebreid Computational Engine
TRAC-P	Reactor transiënte analyse code-drukwaterreactor
TRISO	TTIstructural-isotrope
US DOE	United States Department of Energy
US NRC	Verenigde Staten Nuclear Regulatory Commission
UIHS	Ultimate en voor onbepaalde tijd durend Koellichamen
VISTA-ITL	Verificatie door Integral Simulatie van transiënten en ongevallen - Integrale Test Loop
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association

[tabelopties](#)

Referenties

1.

- [Aguirre et al., 2005](#)
- C. Aguirre, D. Caruge, F. Castrillo, G. Dominicus, AJ Geutjes, V. Saldob, THJJ van der Hagen, D. Hennig, M. Huggenberger, KCJ Ketelaar, A. Manera, JL Munoz-Cobo, H. -M. Prasser, U. Rohde, E. Royer, G. Yadigaroglu
- **Natuurlijke circulatie en stabiliteit prestaties van de BWR (NACUSP)**
- Nuclear Engineering and Design, 235 (2005), pp. 401-409
- [Artikel](#)
- [PDF \(457 K\)](#)
- [Bekijk Record in Scopus](#)

| |

Citerende artikelen (14)

2.

- [Aksan 2008](#)
- N. Aksan
- **Internationale norm problemen en kleine break loss-of-koelmiddel accident (SBLOCA)**
- Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties (2008) <http://dx.doi.org/10.1155/2008/814572> Artikel ID 814.572, 22 p

○

3.

- [Alstad et al., 1956](#)
- CD Alstad, HS Isbin, NR Amundson
- **De veranderende gedrag van de Single-Phase natuurlijke circulatie van het water Loop Systems**
- (1956) Argonne National Laboratory Report, ANL-5409

○

4.

- [Ambrosini en Ferreri, 1997a](#)
- W. Ambrosini, JC Ferreri
- **Numerieke analyse van eenfasige natuurlijke circulatie in een gesloten lus eenvoudige**
- Proceedings van de 11e vergadering op Reactor Physics and Thermal Hydraulics, Pocos de Caldas, MG, Brazilië, Augustus 18-22th 1997 (1997), blz. 676-681

- [Bekijk Record in Scopus](#)

| |

Citerende artikelen (1)

5.

- [Ambrosini en Ferreri, 1997b](#)
- W. Ambrosini, JC Ferreri
- **Stabiliteitsanalyse eenfasige thermosifon lussen door eindige-verschil numerieke methoden**
- Proceedings van Post SMIRT 14 Seminar 18 voor 'passieve veiligheid in de nucleaire installaties', Pisa, Augustus 25-27th 1997 (1997), blz. E21-E210

- [Bekijk Record in Scopus](#)

| |

Citerende artikelen (1)

6.

- [Ambrosini en Ferreri 1998](#)
- W. Ambrosini, JC Ferreri
- **Het effect van afbreekfout de numerieke voorspellen van lineaire stabiliteit begrenzingen in een natuurlijke circulatie eenfasige loop**
- Nuclear Engineering and Design, 183 (1998), blz. 53-76

- [Artikel](#)

|

[PDF \(1176 K\)](#)

|

[Bekijk Record in Scopus](#)

| |

Onder verwijzing naar artikelen (40)

7.

- [Ambrosini en Ferreri 2000](#)
- W. Ambrosini, JC Ferreri
- **Stabiliteitsanalyse eenfasige thermosifon lussen door eindige-verschil numerieke methoden**
- Nuclear Engineering and Design, 201 (2000), blz. 11-23

- [Artikel](#)
|
[PDF \(969 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
Onder verwijzing naar artikelen (29)
- 8.
 - [Ambrosini et al., 2001](#)
 - W. Ambrosini, F. D'Auria, A. Pennati, JC Ferreri
 - **Numerieke effecten bij het voorspellen van eenfasige circulatie stabiliteit**
 - National Heat Transfer Conferentie van UIT, Modena, Italië, Juni 25-27 (2001)
 -
- 9.
 - [Ambrosini 2001](#)
 - W. Ambrosini
 - **Op sommige fysieke en numerieke aspecten in computationeel modelleren van eendimensionale stromingdynamica**
 - 7de Internationale Seminar over recente ontwikkelingen in de Fluid Mechanics, Physics of Fluids en Associated Complex Systems (Fluidos 2001), Buenos Aires, Argentinië, 17-19 oktober (2001)
 -
- 10.
 - [Ambrosini en Ferreri 2003](#)
 - W. Ambrosini, JC Ferreri
 - **Voorspelling van de stabiliteit van de één-dimensionale natuurlijke circulatie met een lage diffusie numerieke schema**
 - Annals of Nuclear Energy, 30 (2003), blz. 1505-1537
 - [Artikel](#)
|
[PDF \(1351 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
Onder verwijzing naar artikelen (25)
- 11.
 - [Ambrosini et al., 2004](#)
 - W. Ambrosini, N. Forgione, JC Ferreri, M. Bucci
 - **Het effect van wandwrijving in eenfasige circulatie stabiliteit bij de overgang tussen laminaire en turbulente stroming**
 - Annals of Nuclear Energy, 31 (2004), blz. 1833-1865
 - [Artikel](#)
|
[PDF \(1159 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
Onder verwijzing naar artikelen (27)
- 12.
 - [Ambrosini en Ferreri 2006](#)
 - W. Ambrosini, JC Ferreri
 - **Analyse van fundamentele verschijnselen in kokend kanaal instabiliteiten met verschillende stroommodellen en numerieke schema**

- Proceedings of op Density Wave instabiliteitsverschijnselen - modellering en experimentele Investigation, 14e Internationale Conferentie over Nuclear Engineering (ICONE 14), Miami, Florida, USA, 17-20 juli, 2006 (2006)

13.

- [Ambrosini 2007](#)
- W. Ambrosini
- **De analogieën in het dynamische gedrag van verwarmde kanalen met koken en superkritische fluïda**
- Nuclear Engineering and Design, 237 (2007), blz. 1164-1174
- [Artikel](#)
|
[PDF \(2210 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
[Onder verwijzing naar artikelen \(40\)](#)

14.

- [Ambrosini 2008](#)
- W. Ambrosini
- **Les uit de toepassing van numerieke technieken bij de analyse van kernreactor thermische-hydraulische verschijnselen**
- Vooruitgang in Kernenergie, 50 (2008), blz. 866-876
- [Artikel](#)
|
[PDF \(1359 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
[Citerende artikelen \(9\)](#)

15.

- [Ambrosini en Sharabi 2008](#)
- W. Ambrosini, MB Sharabi
- **Dimensieloze parameters stabiliteit analyse verhit kanalen bij superkritische druk**
- Nuclear Engineering and Design, 238 (2008), blz. 1917-1929
- [Artikel](#)
|
[PDF \(1604 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
[Citerende artikelen \(54\)](#)

16.

- [Ampomah-Amoako en Ambrosini 2013](#)
- E. Ampomah-Amoako, W. Ambrosini
- **Het ontwikkelen van een CFD methode voor de analyse van stroming stabiliteit verwarmd kanalen met fluïda bij superkritische druk**
- Annals of Nuclear Energy, 54 (2013), blz. 251-262
- [Artikel](#)
|
[PDF \(2495 K\)](#)
|
[Bekijk Record in Scopus](#)
| |
[Citerende artikelen \(9\)](#)

17.
 - [Anderson et al., 1962](#)
 - RP Anderson, LT Bryant, JC Carter, JF Marchaterre
 - **Transient analyse van twee-fase Natural-circulatie-installaties**
 - (1962) Argonne National Laboratory Report, ANL-6653
 -
18.
 - [Angelo et al., 2012](#)
 - G. Angelo, DA Andrade, E. Angelo, WM Torres, G. Sabundjian, LA Macedo, AF Silva
 - **Een numerieke en drie-dimensionale analyse van stationair rechthoekige natuurlijke circulatielus**
 - Nuclear Engineering and Design, 244 (2012), blz. 61-72
 - [Artikel](#)
 - |
 - [PDF \(2722 K\)](#)
 - |
 - [Bekijk Record in Scopus](#)
 - |
 - |
 - [Citerende artikelen \(11\)](#)
19.
 - [ANS 2014](#)
 - ANS, American Nuclear Society
 - Nuclear News, 57 (2014)
 -
20.
 - [Anzieu et al., 2014](#)
 - P. Anzieu, J. Guidez, J.-F. Sauvage, B. Carluet
 - **France voorstel van toegepaste Generation IV SFR SDC**
 - Joint IAEA-GIF SFR Safety Workshop, Juni (2014)
 -
1.
 - [Aoto et al., 2014](#)
 - K. Aoto, blz Dufour, Y. Hingyi, JP Glatz, T.-I. Kim, Y. Ashurko, R. Hill, N. Uto
 - **Samenvatting van natriumgekoelde snelle reactor ontwikkeling**
 - Vooruitgang in Kernenergie, 77 (2014), blz. 247-265
 - [Artikel](#)
 - |
 - [PDF \(8045 K\)](#)
 - |
 - [Bekijk Record in Scopus](#)
 - |
 - [Citerende artikelen \(9\)](#)
2.
 - [ASME 2012](#)
 - ASME, American Society of Mechanical Engineers
 - **Smeden van een nieuwe nucleaire veiligheid Construct**
 - Presidential Task Force van de reactie op Japan kerncentrale evenementen, 978-0-7918-3435-0ASME, New York (2012)
 -
3.
 - [Austregesilo et al., 2006](#)
 - H. Austregesilo, C. Bals, G. Lerchl, Romstedt
 - **ATHLET Mod 2.1 Cycle een Models and Methods**

- (2006) Gesellschaft für Anlagen und- Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH Rapport GRS-P-1 / Vol. 4
-
- 4.
 - [Bae en Kim 2009](#)
 - Y.-Y. Bae, H.-Y. Kim
 - **Convectieve warmteoverdracht naar CO₂ bij superkritische druk stroomt verticaal naar boven in de verticale buizen en een ringvormig kanaal**
 - Experimentele thermische en Fluid Science, 33 (2009), blz. 329-339
 - [Artikel](#)
 - | [PDF \(1271 K\)](#)
 - | [Bekijk Record in Scopus](#)
 - | [Onder verwijzing naar artikelen \(72\)](#)
- 5.
 - [Bae 2011](#)
 - Y.-Y. Bae
 - **Gemengde convectie warmteoverdracht koolzuurgas stroomt opwaarts en neerwaarts in een verticale buis en een ringvormig kanaal**
 - Nuclear Engineering and Design, 241 (2011), blz. 3164-3177
 - [Artikel](#)
 - | [PDF \(2835 K\)](#)
 - | [Bekijk Record in Scopus](#)
 - | [Citerende artikelen \(16\)](#)
- 6.
 - [Basu et al., 2014](#)
 - DN Basu, S. Bhattacharyya, PK Das
 - **Een overzicht van moderne ontwikkelingen in analyses en toepassingen van eenfasige natuurlijke circulatie in nucleaire thermohydraulica**
 - Nuclear Engineering and Design, 280 (2014), blz. 326-348
 - [Artikel](#)
 - | [PDF \(5307 K\)](#)
 - | [Bekijk Record in Scopus](#)
 - | [Citerende artikelen \(13\)](#)
- 7.
 - [Bazin en Pelissier 2006](#)
 - P. Bazin, M. Pelissier
 - **CATHARE 2 V25_1: Beschrijving van de Base Revision 6.1 natuurkundige wetten Gebruikt in de 1D, 0D en 3D-Modules**
 - (2006) CEA Verslag CEA / DER / SSTH / LDA / EM / 2005-038
 -
- 8.
 - [Bea en Gale 2011](#)
 - RG Bea, WE Gale
 - **Regel 26 Verslag over BP's Deepwater Horizon Macondo Blowout**
 - (2011) US District Court, Eastern District van Louisiana, TREX-2001
 -
- 9.
 -

- [Becker et al., 1963](#)
- KM Becker, S. Jahnberg, I. Haga, PT Hansson, RP Mathisen
- **Hydrodynamische instabiliteit en Dynamic Burnout in natuurlijke circulatie Two-Phase Flow een experimentele en theoretische studie**
- (1963) AB Atomenergi Rapport AE-156
-
- 10.
 - [Becker et al., 1964](#)
 - KM Becker, RP Mathisen, O. Eklind, B. Norman
 - **Metingen van hydrodynamische instabiliteiten, Flow Trillingen en Burnout in een natuurlijke circulatie Loop**
 - (1964) AB Atomenergi Rapport AE-131
 -
- 11.
 - [Berenson 1964](#)
 - PJ Berenson
 - **Flow Stabiliteit in Multi-tube Geforceerde convectie Vaporizers**
 - (1964) Air Force Aero Propulsion Laboratory Report APL TDR 64-117
 -
- 12.
 - [Bhatt en Wachowiak 2006](#)
 - SC Bhatt, RM Wachowiak
 - **ESBWR Certification probabilistische risicobeoordeling**
 - (2006) General Electric Company Report NEDO-33201, Rev. 1
 -
- 13.
 - [Boure et al., 1973](#)
 - JA Boure, AE Bergles, LS Tong
 - **Beoordeling van tweefasige stromingsinstabiliteit**
 - Nuclear Engineering and Design, 25 (1973), blz. 165-192
 - [Artikel](#)
 - | [PDF \(2104 K\)](#)
 - | [Bekijk Record in Scopus](#)
 - | [Onder verwijzing naar artikelen \(474\)](#)
- 14.
 - [Burroughs 2003](#)
 - E. Burroughs
 - **Convectie in een Thermosyphon, Bifurcation en Stabiliteitsanalyse**
 - (Proefschrift) De Universiteit van New Mexico, Albuquerque, New Mexico (2003)
 -
- 15.
 - [Burroughs et al., 2005](#)
 - EA Burroughs, EA Coutasias, LA Romero
 - **Een gereduceerde-orde partiële differentiaalvergelijking model voor de stroming in een thermosyfon**
 - Journal of Fluid Mechanics, 543 (2005), pp. 203-237
 - [CrossRef](#)
 - | [Bekijk Record in Scopus](#)

- |
Citerende artikelen (11)
- 16.
- [Chatoorgoon 1986](#)
 - V. Chatoorgoon
 - **Een eenvoudige thermohydraulische stabiliteit code**
 - Nuclear Engineering and Design, 93 (1986), blz. 51-67
 - [Artikel](#)
 - |
 - [PDF \(866 K\)](#)
 - |
 - [Bekijk Record in Scopus](#)
 - |
- Onder verwijzing naar artikelen (40)
- 17.
- [Chatoorgoon 2001](#)
 - V. Chatoorgoon
 - **Stabiliteit van superkritisch fluïdum stroming in één kanaal natuurlijke convectie lus**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (2001), blz. 1963-1972
 - [Artikel](#)
 - |
 - [PDF \(293 K\)](#)
 - |
 - [Bekijk Record in Scopus](#)
 - |
- Citerende artikelen (81)
- 18.
- [Chatoorgoon et al., 2005a](#)
 - V. Chatoorgoon, A. Voodi, D. Fraser
 - **De stabiliteit begrenzing van superkritische stroming in natuurlijke circulatielussen deel I, H₂O studies**
 - Nuclear Engineering and Design, 235 (2005), blz. 2570-2580
 - [Artikel](#)
 - |
 - [PDF \(471 K\)](#)
 - |
 - [Bekijk Record in Scopus](#)
 - |
- Citerende artikelen (47)
- 19.
- [Chatoorgoon et al., 2005b](#)
 - V. Chatoorgoon, A. Voodi, blz Upadhye
 - **De stabiliteit begrenzing van superkritische stroming in natuurlijke circulatielussen deel II, CO₂ en H₂**
 - Nuclear Engineering and Design, 235 (2005), blz. 2581-2593
 - [Artikel](#)
 - |
 - [PDF \(630 K\)](#)
 - |
 - [Bekijk Record in Scopus](#)
 - |
- Citerende artikelen (35)
- 20.
- [Chatoorgoon 2013](#)
 - V. Chatoorgoon
 - **Dimensieloze parameters statische instabiliteit in superkritische verwarmde kanalen**

- International Journal of Heat and Mass Transfer, 64 (2013), blz. 145-154

- [Artikel](#)

|

[PDF \(1435 K\)](#)

|

[Bekijk Record in Scopus](#)

|

[Onder verwijzing naar artikelen \(5\)](#)

1.

- [Chatoorgoon et al., 2007](#)

- V. Chatoorgoon, M. Shah, R. Duffey

- **Lineaire voorspellingen van superkritische stroming instabiliteit in parallelle kanalen**

- Proceedings of 3e International Symposium on SCWR-Design en Technologie, Shanghai, China, 12-15 maart 2007 (Paper SCR2007-P009) (2007)

- Loading

2.

- [Chen et al., 2014](#)

- Y. Chen, C. Yang, M. Zhao, K. Bi, K. Du

- **Geforceerde convectieve warmteoverdracht experiment superkritisch water in verschillende diameter buizen**

- Journal of Energy en Power Engineering, 8 (2014), blz. 1495-1504

- Loading

3.

- [Cheng en Schulenberg 2001](#)

- X. Cheng, T. Schulenberg

- **Heat Transfer bij superkritische druk - literatuurstudie en Toepassing op een HPLWR**

- (2001) Wetenschappelijke Rept. FZKA6609, Forschungszentrum Karlsruhe, Duitsland

- Loading

4.

- [Chilton, 1957](#)

- H. Chilton

- **Een theoretische studie van stabiliteit in waterstroming door verwarmde doorgangen**

- Journal of Nuclear Energy, 5 (1957), blz. 273-284

- Loading

5.

- [CNSC 2008](#)

- CNSC, Canadian Nuclear Safety Commission

- **Het ontwerpen van nieuwe kerncentrales**

- (2008) CNSC Report RD-337

- Loading

6.

- [CNSC / OECD 2014](#)

- CNSC / OECD, Canadian Nuclear Safety Commission

- International Workshop on Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment (PSA), Ottawa, Canada, 17-20 november (2014)

- Loading

7.

- [Collier en Thome, 1996](#)

- JG Collier, JR Thome

- **Convective Boiling en Condensatie**

- (Derde ed.) Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford (1996)

- Loading

8.
 - [Colombo, 2013](#)
 - M. Colombo
 - **Experimenteel onderzoek en numerieke simulatie van de Two-Phase Flow in de spiraalvormige winding Steam Generator**
 - Doctoral Thesis Politecnico di Milano (2013)
 - Loading
9.
 - [Colombo et al., 2012a](#)
 - M. Colombo, A. Cammi, D. Papini, ME Ricotti
 - **Numerieke studie van kokend kanaal instabiliteiten door het opleggen constante drukval randvoorwaarden via een grote bypass**
 - Proceedings van de Internationale Conferentie Nuclear Energy for New Europe 2010, Portoroz, Slovenië 06-09 september, Paper Nummer 413 (2012)
 - Loading
10.
 - [Colombo et al., 2012b](#)
 - M. Colombo, A. Cammi, D. Papini, ME Ricotti
 - **RELAP5 / MOD3.3 studie golf dichtheid instabiliteiten in één kanaal en twee parallelle kanalen**
 - Vooruitgang in Kernenergie, 56 (2012), blz. 15-23
 - Loading
11.
 - [Cornelius, 1965a](#)
 - A. Cornelius
 - **Een onderzoek van instabiliteiten optreden tijdens Heat Transfer naar een superkritische Fluid**
 - (Proefschrift) Oklahoma State University (1965)
 - Loading
12.
 - [Cornelius, 1965b](#)
 - AJ Cornelius
 - **Een onderzoek van instabiliteiten optreden tijdens Heat Transfer naar een superkritische Fluid**
 - (1965) Argonne National Laboratory Report, ANL-7032
 - Loading
13.
 - [Costa et al., 2008](#)
 - AL Costa, A. Petruzzi, F. D'Auria, W. Ambrosini
 - **Analyses van instabiliteit gebeurtenissen in de Peach Bottom-2 BWR middels thermisch hydraulische en 3D neutron kinetische gekoppeld codes techniek**
 - Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties, 2008 (2008) Artikel ID 423175, 17 p <http://dx.doi.org/10.1155/2008/423175>
 - Loading
14.
 - [Creveling en Schoenhals 1966](#)
 - HF Creveling, RJ Schoenhals
 - **Steady Flow Kenmerken van een Single-Phase natuurlijke circulatie Loop**
 - Technisch rapport nr 15 Purdue Research Foundation (1966) COO-1177-1115
 - Loading
15.
 - [CSA 1998](#)
 - CSA, Computer Simulation & Analysis, Inc.

- **RETRAN-3D-A programma voor Transient Thermal-hydraulische analyse van complexe Fluid Flow Systems Volume 1, Theorie en Numeriek**
- (1998) Electric Power Research Institute Report, NP-7405, Volume 1, Revision 3
- Loading
- 16.
 - [D'Auria 1997](#)
 - F. D'Auria (Ed.), State-of-the-Art Verslag over Boiling Water Reactor Stability (1997) OESO-verslag NEA / CSNI / R (96) 21, de OESO / GD (97) 13
 - Loading
- 17.
 - [Debrah et al., 2013](#)
 - SK Debrah, W. Ambrosini, Y. Chen
 - **Discussie over de stabiliteit van natuurlijke circulatielussen met superkritische druk fluïda**
 - Annals of Nuclear Energy, 54 (2013), blz. 47-57
 - Loading
- 18.
 - [de Kruijf et al., 2000](#)
 - WJM de Kruijf, THJJ van der Hagen, RF Mudde
 - **CIRCUS; een natuurlijke circulatie in twee fasen flow-faciliteit**
 - Eurotherm Seminar No. 63, 6-8 september 1999, Genua, Italië, 391-395 (2000)
 - Loading
- 19.
 - [DESRAYAUD et al., 2013](#)
 - G. DESRAYAUD, A. Fichera, G. Lauriat
 - **Tweedimensionale numerieke analyse van een rechthoekige gesloten lus thermosifon**
 - Applied Thermal Engineering, 50 (2013), blz. 187-196
 - Loading
- 20.
 - [Dreier et al., 1996](#)
 - J. Dreier, M. Huggenberger, C. Aubert, T. Bandurski, O. Fischer, J. Heilzer, S. Lomperski, H.-J. Strassberger, G. Varadi, G. Yadigaroglu
 - **De PANDA faciliteit en de eerste testresultaten**
 - Kerntechnik, 61 (1996), blz. 214-222
 - Loading
- 1.
 - [Duffey 2015](#)
 - RB Duffey
 - **Extreme gebeurtenissen: oorzaken en voorspellingen**
 - Uitgaande van de Probabilistische Safety Analysis Conference PSA 2015 American Nuclear Society, Sun Valley, Idaho (2015) Paper 12222
 - Loading
- 2.
 - [Duffey en Ha, 2013](#)
 - RB Duffey, T. Ha
 - **De waarschijnlijkheid en de timing van de macht systeemherstel**
 - IEEE Transactions on Power Systems, 28 (2013), blz. 3-9
 - Loading
- 3.
 - [Duffey en Hughes, 1991](#)
 - RB Duffey, ED Hughes
 - **Statische stroom instabiliteit ontstaan in buizen, kanalen, ringen en ontdoen bundels**

- International Journal of Heat and Mass Transfer, 34 (1991), blz. 2483-2496
- Loading
- 4.
 - [Duffey en Pioro 2005](#)
 - RB Duffey, IL Pioro
 - **Experimentele warmteoverdracht superkritisch kooldioxide stroomt in kanalen (survey), Nuclear Engineering and Design**
 - 235 (2005), blz. 913-924
 - Loading
- 5.
 - [Duffey en Saull 2008](#)
 - RB Duffey, JW Saull
 - **Managing Risk: The Human Element**
 - John Wiley and Sons, Chichester, Verenigd Koninkrijk (2008)
 - Loading
- 6.
 - [Duffey en Sursock 1987](#)
 - RB Duffey, JP Sursock
 - **Natuurlijke circulatie fenomenen aan kleine pauzes en transiënten relevant**
 - Nuclear Engineering and Design, 102 (1987), blz. 115-128
 - Loading
- 7.
 - [Dudour en Carluéc 2011](#)
 - P. Dudour, B. Carluéc
 - **Veiligheid implicatie in het licht van de Fukushima kerncentrale ongeval**
 - GIF-INPRO Workshop, 30 november - 1 december, IAEA, Wenen (2011)
 - Loading
- 8.
 - [Dutta et al., 2015](#)
 - G. Dutta, C. Zhang, J. Jiang
 - **Analyse van parallelle kanalen instabiliteiten in de CANDU superkritischwaterreactor**
 - Annals of Nuclear Energy, 83 (2015), blz. 264-273
 - Loading
- 9.
 - [EPRI et al., 2012](#)
 - EPRI, US DOE, US NRC
 - **Technisch Rapport: Centraal- en Oost-Verenigde Staten Seismic bronkarakterisering voor nucleaire installaties**
 - (2012) EPRI 1.021.097, DOE / NE-0140, NUREG-2115
 - Loading
- 10.
 - [Escrivá et al., 2008](#)
 - A. Escrivá, JLM Cobo, JM San Roman, MA Darriba, J. March-Leuba
 - **LAPUR 60 Handboek**
 - (2008) Oak Ridge National Laboratory Report NUREG / CR-6958
 - Loading
- 11.
 - [Ferrerri et al., 1995](#)
 - JC Ferrerri, W. Ambrosini, F. D'Auria
 - **Over de convergentie van RELAP5 berekeningen in een enkelfasige, natuurlijke circulatie proef probleem**

- Proceedings of X-ENFIR, 7-11th augustus 1995 als de Lindoia, SP, Brazilië (1995), blz. 303-307
- Loading
- 12.
 - [Ferreri en Ambrosini 1999](#)
 - JC Ferreri, W. Ambrosini
 - **Verificatie van RELAP5 / MOD31 met Theoretische Stability Resultaten**
 - (1999) United State Nuclear Regulatory Commission Report NUREG-IA-0151
 - Loading
- 13.
 - [Ferreri 1999](#)
 - JC Ferreri
 - **Eenfasige natuurlijke circulatie in eenvoudige schakelingen - reflecties op de numerieke simulatie**
 - Uitgenodigd Lezing in de Eurotherm Seminar No 63 op Single en Twee- Fase natuurlijke circulatie, 06-08 september 1999, Genua, Italië (1999)
 - Loading
- 14.
 - [Ferreri en Ambrosini 2002](#)
 - JC Ferreri, W. Ambrosini
 - **Op de analyse van thermisch fluïdum dynamica instabiliteiten door numerieke discretisatie van behoudsvergelijkingen**
 - Nuclear Engineering and Design, 215 (2002), blz. 153-170
 - Loading
- 15.
 - [Furuya 2006](#)
 - M. Furuya
 - **Experimentele en Analytische modellering van natuurlijke circulatie en geforceerde circulatie BWR - Thermal-hydraulische, Core-Wide, en de regionale stabiliteit Phenomena**
 - (Proefschrift) Technische Universiteit Delft (2006)
 - Loading
- 16.
 - [Garlid et al., 1961](#)
 - K. Garlid, NR Amundson, HS Isbin
 - **Een theoretische studie van de Transient werking en stabiliteit van Two-Phase natuurlijke circulatie Loops**
 - (1961) Argonne National Laboratory Report, ANL-6381
 - Loading
- 17.
 - [Gartia et al., 2007](#)
 - MR Gartia, DS Pilkhwal, PK Vijayan, D. Saha
 - **Analyse van metastabiele regimes in een parallel kanaal enkelfasig natuurlijke circulatie systeem RELAP5 / MOD3.2**
 - International Journal of Thermal Sciences, 46 (2007), blz. 1064-1074
 - Loading
- 18.
 - [GIF 2011](#)
 - GIF, Generation IV International Forum
 - **Een Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) voor het Generation IV Nucleaire Systemen**
 - (2011) GIF / RSWG / 2010/002 / rev1, Versie 1.1
 - Loading
- 19.
 - Loading

- [GIF, 2014a](#)
 - GIF, Generation IV International Forum
 - **Guidance Document for Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) - (GDI)**
 - (2014) Europese Commissie Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek Rapport voor GIF Risk and Safety Working Group, GIF / RSWG / 2014/001, versie 1.0
 - Loading
- 20.
- [GIF, 2014b](#)
 - GIF, Generation IV International Forum
 - **Technology Roadmap Update voor Generation IV Nuclear Energy Systems**
 - Nuclear Energy Agency Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (2014)
 - Loading
- 1.
- [Goldberg en Rosner 2011](#)
 - SM Goldberg, R. Rosner
 - **Nuclear Reactors: generatie op generatie**
 - American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, MA (2011) <https://www.amacad.org/pdfs/nuclearReactors.pdf>
 - Loading
- 2.
- [Gouirand, 1988](#)
 - JM Gouirand
 - **Clotaire Program, Beschrijving en productie van de Mock-up**
 - CEA, Cadarache (1988) DRE / STRE / LGV 88-876
 - Loading
- 3.
- [Genade en Krejsa 1967](#)
 - Grace TM, EA Krejsa
 - **Analytische en experimentele studie van Boiler instabiliteiten Due to Feed-systeem - onderkoeld Region Coupling**
 - (1967) National Aeronautics and Space Administration Report NASA TN D-3961
 - Loading
- 4.
- [Gillette et al., 1980](#)
 - JL Gillette, RM Singer, JV Tokar, JE Sullivan
 - **Experimenteel onderzoek naar de overgang van gedwongen natuurlijke circulatie in EBR-II bij laag vermogen en stroming**
 - Journal of Heat Transfer, 102 (1980), blz. 525-530 <http://dx.doi.org/10.1115/1.3244335>
 - Loading
- 5.
- [Grandi et al., 1998](#)
 - G. Grandi, N. Hoyer, L. Belblidia
 - **Twee-vloeistof thermohydraulica mogelijkheden van RAMONA-5**
 - Proceedings van de Internationale Conferentie over de Physics of Nuclear Science and Technology, 5-08 oktober 1998, Long Island, NY, USA (1998), blz. 1621-1625
 - Loading
- 6.
- [Greif et al., 1979](#)
 - R. Greif, Y. Zvirin, A. Mertol
 - **De tijdelijke en stabiliteit gedrag van een natuurlijke convectie lus**
 - Journal of Heat Transfer, 101 (1979), blz. 684-688
 - Loading

7.
 - [Greif, 1988](#)
 - R. Greif
 - **Natuurlijke circulatie loops**
 - Journal of Heat Transfer, 110 (1988), blz. 1243-1258
 - Loading
8.
 - [Gruszynski en Viskanta 1983](#)
 - MJ Gruszynski, R. Viskanta
 - **Heat Transfer naar Water uit een verticale buis Bundle onder Natuurlijke-Circulatie Voorwaarden**
 - (1983) Argonne National Laboratory Report NUREG / CR-3167, ANL-83-7
 - Loading
9.
 - [Gu et al., 2015a](#)
 - HY Gu, HB Li, ZX Hua, D. Liu, M. Zhao
 - **Warmteoverdracht aan superkritisch water in een 2 x 2 rod bundel**
 - Annals of Nuclear Energy, 83 (2015), blz. 114-124
 - Loading
10.
 - [Gu et al., 2015b](#)
 - HY Gu, M. Zhao, X. Cheng
 - **Experimentele studies warmteoverdracht aan superkritisch water in ronde buizen bij hoge warmtestromen**
 - Experimentele thermische en Fluid Science, 65 (2015), blz. 22-32
 - Loading
11.
 - [Guo et al., 2001](#)
 - L.-J. Guo Z.-P. Feng, X.-J. Chen
 - **Drukverlies oscillatie stoom-water tweefasen stroming in een schroeflijnvormig gewikkelde buis**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (2001), blz. 1555-1564
 - Loading
12.
 - [Ha et al., 2010](#)
 - K.-S. Ha, H.-Y. Jeong, C. Cho, Y.-M. Kwon, Y.-B. Lee, D. Hahn
 - **Simulatie van de EBR-II loss-of-flow tests waarbij de code MARS**
 - Nucleaire technologie, 169 (2010), blz. 134-142
 - Loading
13.
 - [Hamidouche en Bousbia-Salah 2006](#)
 - T. Hamidouche, A. Bousbia-salah
 - **RELAP5 / 3,2 beoordeling tegen lage druk ontstaan van stromingsinstabiliteit parallel verwarmde cannels**
 - Annals of Nuclear Energy, 33 (2006), blz. 510-520
 - Loading
14.
 - [Hamilton et al., 1954](#)
 - DC Hamilton, FE Lynch, LD Palmer
 - **De aard van Flow van Gewone Fluids in een Thermal Convection Harp**
 - (1954) ORNL-1624

15.
 - Loading
 - [Harden 1963](#)
 - DG Harden
 - **Transient gedrag van een natuurlijke circulatie Loop die in de buurt van de thermodynamische Critical Point**
 - (1963) Argonne National Laboratory Report, ANL-6710
16.
 - Loading
 - [Haroldsen 2008](#)
 - R. Haroldsen
 - **Het verhaal van de BORAX kernreactor en de EBR-1 Kernsmelting**
 - (2008) <http://www.ne.anl.gov/pdfs/reactors/Story-of-BORAX-Reactor-by-Ray-Haroldsen-v2.pdf> (toegankelijk 23.08.15.)
 - Loading
17.
 - [He et al., 2004](#)
 - S. Hij, WS Kim, PX Jiang, JD Jackson
 - **Simulatie van gemengde convectieve warmteoverdracht aan koolstofdioxide bij superkritische druk**
 - International Journal of Mechanical Engineering Science, 218 (2004), p. 1281-1296
 - Loading
18.
 - [He et al., 2008](#)
 - S. Hij, WS Kim, JD Jackson
 - **Een computationele studie van convectieve warmteoverdracht aan koolstofdioxide bij een druk boven de kritische waarde**
 - Applied Thermal Engineering, 28 (2008), blz. 1662-1675
 - Loading
19.
 - [Howlett 1995](#)
 - RC Howlett II
 - **De Industrial Operator's Handbook**
 - Techstar Inc, Pocatello, Idaho (1995)
 - Loading
20.
 - [Hoyer 1994](#)
 - N. Hoyer
 - **MONA, 7 Vergelijking transient tweefasenstroming model LWR dynamica**
 - Proceedings van de Internationale Conferentie over nieuwe trends in de Nuclear System thermohydraulica (1994), blz. 271-280
 - Loading
1.
 - [Hu 2010](#)
 - R. Hu
 - **Stabiliteit Analyse van de Boiling Water Reactor: methoden en geavanceerde ontwerpen**
 - (Proefschrift) Massachusetts Institute of Technology (2010)
 - Loading
2.
 - [Hu en Kazimi 2011](#)
 - R. Hu, MS Kazimi
 - **-Flashing veroorzaakte instabiliteit analyse en de start-up van natuurlijke circulatie kokend reactoren**

- Nucleaire technologie, 176 (2011), blz. 57-71
- Loading
- 3.
 - [Hu en Kazimi 2012](#)
 - R. Hu, MS Kazimi
 - **Kokend water reactor stabiliteitsstudie door TRACE / PARCS: modellering effecten en casus tijd versus frequentiebenadering**
 - Nucleaire technologie, 177 (2012), blz. 8-28
 - Loading
- 4.
 - [Hughes et al., 1981](#)
 - ED Hughes, MP Paulsen, LJ Agee
 - **Een drift flux model twee-fasestroom voor RETRAN**
 - Nucleaire technologie, 54 (1981), blz. 410-421
 - Loading
- 5.
 - [Hughes en Katsma 1983](#)
 - ED Hughes, KR Katsma
 - **Numerieke oplossingsmethode verbeteringen RETRAN**
 - Nuclear Technology, 61 (1983), blz. 167-180
 - Loading
- 6.
 - [Hwang et al., 2005](#)
 - YD Hwang, SH Yang, SH Kim, SW Lee, HK Kim, HY Yoon, GH Lee, KH Bae, YJ Chung
 - **Model Beschrijving van TASS / SMR Code**
 - Korea Atomic Energy Research Institute (2005) KAERI / TR-3082/2005
 - Loading
- 7.
 - [Hwang et al., 2006](#)
 - YD Hwang, GH Lee, YJ Chung, HC Kim, DJ Chang
 - **Evaluatie van de TASS / SMR Code Met behulp van Basic Test Problemen**
 - Korea Atomic Energy Research Institute (2006) KAERI / TR-3156/2006
 - Loading
- 8.
 - [IAEA, 2001](#)
 - IAEA
 - **Thermohydraulische Relaties for Advanced Watergekoelde reactoren**
 - (2001) IAEA-TECDOC-1203, Wenen
 - Loading
- 9.
 - [IAEA, 2002](#)
 - IAEA
 - **Natuurlijke circulatie gegevens en methoden voor Advanced Watergekoelde Nuclear Power Plant Designs**
 - (2002) IAEA-TECDOC-1281, Wenen
 - Loading
- 10.
 - [IAEA 2004](#)
 - IAEA
 - **Status van de Advanced Light Water Reactor Designs**
 - (2004) 2004, IAEA-TECDOC-1391, Wenen, Oostenrijk

11.
 - Loading
 - [IAEA 2005](#)
 - IAEA
 - **Natuurlijke circulatie in Watergekoelde kerncentrales, Phenomena, Models, en methodologie voor de betrouwbaarheid van het systeem Assessments**
 - IAEA-TECDOC-1474 IAEA, Wenen (2005)
12.
 - Loading
 - [IAEA 2009](#)
 - IAEA
 - **Passive Safety Systems en natuurlijke circulatie in Watergekoelde Nuclear Power Plants**
 - IAEA-TECDOC-1624 IAEA, Wenen, Oostenrijk (2009)
13.
 - Loading
 - [IAEA, 2013](#)
 - IAEA
 - **Benchmark analyses over de natuurlijke circulatie uitgevoerd tijdens de PHENIX End-of-Life Experimenten**
 - TECDOC No. 1703 IAEA, Wenen, Oostenrijk (2013)
14.
 - Loading
 - [IAEA 2012](#)
 - IAEA
 - **Natuurlijke circulatie Phenomena en het modelleren van geavanceerde watergekoelde reactoren**
 - (2012) IAEA-TECDOC-1677, Wenen
15.
 - Loading
 - [IAEA 2014](#)
 - IAEA
 - **Heat Transfer Gedrag en thermohydraulica Code Testing voor superkritische watergekoelde Reactoren (SCWRs)**
 - (2014) IAEA-TECDOC-1746, Wenen
16.
 - Loading
 - [INEL 1995](#)
 - INEL, Idaho National Engineering Laboratory
 - **RELAP5 / MOD3 Code Manual, Vols. 1-6**
 - (1995) INEL-95/0174, NUREG / CR-5535
17.
 - Loading
 - [INEL 1992](#)
 - INEL, Idaho National Engineering Laboratory
 - **TRAC-BF1 / MOD1; een Advanced Best-schatting computerprogramma voor BWR Accident Analysis, Vols. 1-3**
 - (1992) EGG-2626, NUREG / CR-4356
18.
 - Loading
 - [INL 2014](#)
 - INL, Idaho National Laboratory

- **Richtlijnen voor het ontwikkelen van Principal Ontwerp Criteria for Advanced (Non-light Water) Reactors**
 - (2014) Idaho National Laboratory Report INL / EXT-14-31.179 Rev. 1
 - Loading
- 19.
- [Ishii 1976](#)
 - M. Ishii
 - **Studie over Flow instabiliteiten in Two-Phase Flow mengsels**
 - (1976) Argonne National Laboratory Report ANL-76-23
 - Loading
- 20.
- [Ishii et al., 1996](#)
 - M. Ishii, ST Revankar, R. Dowlati, ML Bertodano, I. Babelli, W. Wang, H. Pokharna, VH Ransom, R. Viskanta, T. Wilmarth, JT Han
 - **Wetenschappelijke ontwerp van Purdue University Multi-Dimensional Integral Test Assembly (PUMA) voor GE SBWR**
 - (1996) Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission Report NUREG / CR-6309
 - Loading
- 1.
- [ISL 2001](#)
 - ISL, Information Systems Laboratories, Inc.
 - **RELAP5 / MOD33 Code Manual Volume I, Code Structure, System Models, en oplossingsmethoden**
 - (2001) Verenigde Staten Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG / CR-5535 / Rev 1- Volume I
 - Loading
- 2.
- [Jackson, 2013](#)
 - JD Jackson
 - **Vloeistofstroming en convectieve warmteoverdracht fluïda bij superkritische druk**
 - Nuclear Engineering and Design, 264 (2013), blz. 24-40
 - Loading
- 3.
- [Jain, 1965](#)
 - KC Jain
 - **Zelf Aanhoudende Hydrodynamische oscillaties in een natuurlijke-circulatie Two-Phase-Flow Boiling Loop**
 - (1965) Argonne National Laboratory Report ANL-7073
 - Loading
- 4.
- [Jain en Rizwan-Uddin 2008](#)
 - PK Jain, Rizwan-Uddin
 - **Numerieke analyse van superkritische stroming instabiliteiten in een natuurlijke circulatielus**
 - Nuclear Engineering and Design, 238 (2008), blz. 1947-1957
 - Loading
- 5.
- [Jain en Conradini 2006](#)
 - R. Jain, ML Conradini
 - **Een lineaire stabiliteitsanalyse voor natuurlijk circulatielussen onder superkritische omstandigheden**
 - Nucleaire technologie, 155 (2006), blz. 312-323

6.
 - Loading
 - [Jeglic en Grace, 1965](#)
 - FA Jeglic, TM Grace
 - **Begin van de Flow oscillaties in Gedwongen-Flow onderkoeld Boiling**
 - (1965) National Aeronautics and Space Administration Report NASA TN D-2821
7.
 - Loading
 - [Jensen, 1992](#)
 - P. Jensen
 - **BWR Stabiliteitsanalyse Methoden en gevoeligheden**
 - (1992) Nuclear Safety Analysis Center Report NSAC-172
8.
 - Loading
 - [Jingjing et al., 2015](#)
 - L. Jingjing, Z. Tao, S. Mingqiang, H. Qijun, H. Yanping, A. Zejun
 - **CFD analyses superkritische waterstroom instabiliteit in parallelle kanalen**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 86 (2015), blz. 923-929
9.
 - Loading
 - [Kakac en Bon 2008](#)
 - S. Kakac, B. Bon
 - **Een overzicht van twee-fasestroom dynamische instabiliteiten in de buis kokende systemen**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 51 (2008), blz. 399-433
10.
 - Loading
 - [Keller, 1967](#)
 - JB Keller
 - **Periodieke oscillaties in een model van thermische convectie**
 - Journal of Fluid Mechanics, 26 (deel 3) (1967), blz. 599-606
11.
 - Loading
 - [Kelly 2014](#)
 - JE Kelly
 - **Generation IV International Forum: een decennium van de vooruitgang door middel van internationale samenwerking**
 - Vooruitgang in Kernenergie, 77 (2014), blz. 240-246
12.
 - Loading
 - [Kim et al., 2013](#)
 - S. Kim, B.-U. Bae, Y.-J. Cho, Y.-S. Park, K.-H. Kang, BJ Yun
 - **Een experimentele studie naar de validering van koelvermogen voor de passieve Auxiliary voedingswater System (PAFS) condensatiewarmtewisselaar**
 - Nuclear Engineering and Design, 260 (2013), blz. 54-63
13.
 - Loading
 - [Kommer 2015](#)
 - EM Kommer
 - **Numerieke modellering van stroming kokende instabiliteiten gebruikt TRACE**
 - Annals of Nuclear Energy, 76 (2015), blz. 263-270

14.
 - Loading
 - [Kozmenkov et al., 2012](#)
 - Y. Kozmenkov, U. Rohde, A. Manera
 - **Validatie van de RELAP5 code voor de modellering van het knippen van geïnduceerde instabiliteiten onder natuurlijke circulatie omstandigheden met behulp van experimentele gegevens van de CIRUS testfaciliteit**
 - Nuclear Engineering and Design, 243 (2012), blz. 168-175
15.
 - Loading
 - [Krepper en Prasser 1999](#)
 - E. Krepper, H.-M. Prasser
 - **Natuurlijke circulatie experimenten aan de ISB-VVER integrale proefruimte berekeningen met de thermische-hydraulische code ATHLET**
 - Nucleaire technologie, 128 (1999), blz. 75-86
16.
 - Loading
 - [Kumar en Gopal 2009](#)
 - KK Kumar, MR Gopal
 - **Steady-state analyse van CO₂ gebaseerde natuurlijke circulatielussen met terminale warmtewisselaars**
 - Applied Thermal Engineering, 29 (10) (2009), blz. 1893-1903
17.
 - Loading
 - [LANL 1986](#)
 - LANL, Los Alamos National Laboratory
 - **TRAC-PFL / MODL: een geavanceerde Best-Estimate computerprogramma voor drukwaterreactor Thermal-Hydraulic Analyse**
 - (1986) NUREG / CR-3858, LA-10157-MS
18.
 - Loading
 - [Lowdermilk et al., 1958](#)
 - WH Lowdermilk, CD Lanzo, BL Siegel
 - **Onderzoek van Boiling Burnout en Flow instabiliteit voor water stroomt in Tubes**
 - (1958) National Advisory Committee for Aeronautics Report NACA TN 4382
19.
 - Loading
 - [Lahey en Drew, 1980](#)
 - RT Lahey Jr., D. Drew
 - **Een beoordeling van de literatuur LWR Instabiliteit Modes Verwante**
 - (1980) Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission Report NUREG / CR-1414
20.
 - Loading
 - [Lahey et al., 1990](#)
 - RT Lahey Jr., MZ Podowski, A. Clausse, N. DeSanctis
 - **Een lineaire analyse van kanaal naar kanaal instabiliteit modes**
 - Chemical Engineering Communications, 93 (1990), blz. 75-81
1.
 - Loading
 - [Lakshmanan en Pandey 2009](#)
 - SP Lakshmanan, M. Pandey
 - **Analyse van de startup oscillaties in natuurlijke circulatie kokend systemen**

- Nuclear Engineering and Design, 239 (2009), blz. 2391-2398
- Loading
- 2.
 - [Lerchel en Austregesilo 2006](#)
 - G. Lerchel, H. Austregesilo
 - **ATHLET Mod 2.1 Cycle een, User's Manual**
 - (2006) Gesellschaft für Anlagen und- Reaktorsicherheit (GRS) GmbH Rapport GRS-p-1 / Vol. 1, Rev. 4
 - Loading
- 3.
 - [Levy en Beckjord 1960](#)
 - S. Levy, ES Beckjord
 - **Hydraulische instabiliteit in een natuurlijke circulatielus met netto stoom bij 1000 psia**
 - Heat Transfer Conference, Paper nr 60-HT-27, American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, New York (1960)
 - Loading
- 4.
 - [Lorenz 1963](#)
 - NL Lorenz
 - **Deterministische niet-periodieke stroming**
 - Journal of Atmospheric Sciences, 20 (1963), blz. 130-141
 - Loading
- 5.
 - [Lottes et al., 1963](#)
 - PA Lottes, RP Anderson, BM Hoflund, JF Marchaterre, FM Petrick, GF Popper, RJ Weatherhead
 - **Boiling Water Reactor Technology Statuut van het Art Report**
 - (1963) Argonne National Laboratory Report, ANL-6561
 - Loading
- 6.
 - [Manavela Chiapero et al., 2012](#)
 - M. Manavela Chiapero, M. Fernandino, CA Dorao
 - **Review op drukval oscillaties in kokend systemen**
 - Nuclear Engineering and Design, 250 (2012), blz. 436-447
 - Loading
- 7.
 - [Manavela Chiapero et al., 2013a](#)
 - M. Manavela Chiapero, M. Fernandino, CA Dorao
 - **De invloed van warmteflux bijwerking tijdens drukval oscillatie - een numerieke analyse**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 63 (2013), blz. 31-40
 - Loading
- 8.
 - [Manavela Chiapero et al., 2013b](#)
 - E. Manavela Chiapero, M. Fernandino, CA Dorao
 - **Numerieke analyse drukval oscillaties in parallelle kanalen**
 - International Journal of meelfasestroming, 56 (2013), blz. 15-24
 - Loading
- 9.
 - [Mangal et al., 2012](#)
 - A. Mangal, V. Jain, AK Nayak
 - **Vermogen van de RELAP5 code om natuurlijke circulatie gedrag in testfaciliteiten simuleren**

- Vooruitgang in Kernenergie, 61 (2012), blz. 1-16
- Loading
- 10.
 - [Marcel 2007](#)
 - CP Marcel
 - **Experimentele en numerieke stabiliteit Onderzoek naar natuurlijke circulatie kokendwaterreactoren**
 - (Proefschrift) Technische Universiteit Delft (2007)
 - Loading
- 11.
 - [Maart-Leuba 1984](#)
 - J. March-Leuba
 - **Dynamisch gedrag van kokendwaterreactoren**
 - (Proefschrift) University of Tennessee-Knoxville (1984)
 - Loading
- 12.
 - [Maart-Leuba en Rey 1993](#)
 - J. March-Leuba, J. Rey
 - **Gekoppelde thermo-hydraulische-neutronische instabiliteiten in kokend water kernreactoren, Een overzicht van de stand van de techniek**
 - Nuclear Engineering and Design, 145 (1993), blz. 97-111
 - Loading
- 13.
 - [Mascari et al., 2012](#)
 - E. Mascari, G. Vella, BG Woods, F. D'Auria
 - **Analyses van de OSU-MASLWR experimentele testfaciliteit**
 - Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties, 2012 (2012) <http://dx.doi.org/10.1155/2012/528241> Artikel ID 528.241
 - Loading
- 14.
 - [Men et al., 2014](#)
 - Q. Mannen, X. Wang, X. Zhou, X. Meng
 - **Warmteoverdracht analyse van passieve warmteafvoer warmtewisselaar onder natuurlijke convectie voorwaarde tank**
 - Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties, 2014 (2014) Artikel ID 279791, 8 p
 - Loading
- 15.
 - [Mertol 1980](#)
 - A. Mertol
 - **Heat Transfer en vloeistofstroom in Thermosyphons**
 - (Proefschrift) Universiteit van Californië in Berkeley (1980)
 - Loading
- 16.
 - [Mertol et al., 1981](#)
 - A. Mertol, R. Treuren, Y. Zvirin
 - **De tijdelijke, steady state en stabiliteit gedrag van een natuurlijke convectie lus met een doorstroming**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981), blz. 621-633
 - Loading
- 17.
 - [Misale 2014](#)
 - M. Misale

- **Overzicht van eenfase natuurlijke circulatie lussen**
- Proceedings van de Internationale Conferentie over Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2014 (2014) <http://dx.doi.org/10.15224/978-1-63248-022-4-101>
- Loading
- 18.
 - [Misale et al., 2000](#)
 - M. Misale, P. Ruffino, M. Frogheri
 - **De invloed van de wand warmtecapaciteit en axiale geleiding via een enkelfasige natuurlijke circulatie, 2-D numerieke studie**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 36 (2000), blz. 533-539
 - Loading
- 19.
 - [Misale et al., 2012](#)
 - M. Misale, F. Devia, blz Garibaldi
 - **Experimenten met Al₂O₃ nanofluid in een enkelfasige circulatie mini-lus, voorlopige resultaten**
 - Applied Thermal Engineering, 40 (2012), blz. 64-70
 - Loading
- 20.
 - [Modarres 2015](#)
 - M. Modarres
 - **Multi-unit kerncentrale risico's en gevolgen van de kwantitatieve doelstellingen gezondheid**
 - Proceedings van de Amerikaanse Nuclear Society Probabilistic Safety Analysis Conference (PSA2015), Sun Valley, Idaho april 26-30 (2015)
 - Loading
- 1.
 - [Mori, 1998](#)
 - M. Mori
 - **Benchmarking en kwalificatie van RETRAN-03 voor BWR stabiliteit analyse in vergelijking met de frequentie-domein stabiliteit analyse code**
 - Nucleaire technologie, 121 (1998), blz. 260-274
 - Loading
- 2.
 - [Muñoz-Cobo et al., 2002](#)
 - JL Muñoz-Cobo, MZ Podowski, S. Chiva
 - **Parallelkanaal instabiliteiten in kokend water reactorsystemen: randvoorwaarden uit fase oscillaties**
 - Annals of Nuclear Energy, 29 (2002), blz. 1891-1917
 - Loading
- 3.
 - [Nayak en Vijayan 2008](#)
 - AK Nayak, PK Vijayan
 - **Flow instabiliteiten in kokend twee fasen natuurlijke circulatie-installaties, een herziening**
 - Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties, 2008 (2008) <http://dx.doi.org/10.1155/2008/573192> Artikel ID 573.192, 15 p
 - Loading
- 4.
 - [Nakai 2013](#)
 - R. Nakai
 - 3e Joint GIF-IAEA Workshop over SDC voor SFRS, 26-27 februari, Wenen (2013)
 - Loading
- 5.

- [NEI 2012](#)
 - NEI, Nuclear Energy Institute
 - **Gevarieerd en flexibel Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide**
 - (2012) Nuclear Energy Institute Report NEI 12-06 [ontwerp Rev 0], Washington, DC (US NRC Toetreding nummer ML122221A205)
- 6.
- Loading
 - [Oka en Mori 2014](#)
 - Y. Oka, H. Mori (Eds.), Superkritische-Pressure Light watergekoelde reactoren, 978-4-431-55024-2, Springer, Tokyo (2014)
- 7.
- Loading
 - [Okano 2014](#)
 - T. Okano
 - **SDC discussies met betrekking tot praktische eliminatie: ongeval situaties**
 - IAEA-GIF Workshop voor de veiligheid van SFR, IAEA, Wenen, 10-11 Juni (2014)
- 8.
- Loading
 - [Otaduy en maart-Leuba 1990](#)
 - PJ Otaduy, J. March-Leuba
 - **LAPUR Gebruikershandleiding**
 - (1990) NUREG / CR-542, ORNL / TM-11285
- 9.
- Loading
 - [Ozawa et al., 1989](#)
 - M. Ozawa, K. Akagawa, T. Sakaguchi
 - **Stromingsinstabiliteiten parallel-kanaal stroomsysteem gas-vloeistof tweefase mengsels**
 - International Journal of stroom met meerdere fasen, 15 (1989), blz. 639-657
- 10.
- Loading
 - [Papini et al., 2014](#)
 - D. Papini, M. Colombo, A. Cammi, ME Rocotti
 - **Experimenteel en theoretisch onderzoek golf- dichtheid instabiliteiten in spiraalvormig gewikkelde buizen**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 68 (2014), blz. 343-356
- 11.
- Loading
 - [Park et al., 2014](#)
 - H.-S. Park, B.-Y. Min, Y.-G. Jung, Y.-C. Shin, Y.-J. Ko, S.-J. Yi
 - **Het ontwerp van de VISTA-ITL testfaciliteit voor een integrale soort reactor van SMART en een post-test simulatie van een SBLOCA-test**
 - Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties, 2014 (2014) Artikel ID 840.109, 14 p
- 12.
- Loading
 - [Park et al., 2008](#)
 - H.-S. Park, K.-Y. Choi, S. Cho, S.-Y. Yi, C.-K. Park, M.-K. Chung
 - **Experimenteel onderzoek naar de natuurlijke circulatie van een passieve resterende hitteverwijderingssysteem een integrale reactor na een veiligheidsrelevante gebeurtenis**
 - Annals of Nuclear Energy, 35 (2008), blz. 2249-2258
- 13.
- Loading
 - [Peng et al., 1984](#)

- SJ Peng, MZ Podowski, RT Lahey Jr., M. Becker
- **NUFREQ-NP, een computer code voor de stabiliteit analyse van kokend water kernreactoren**
- Nuclear Science and Engineering, 88 (1984), blz. 404-411
- Loading
- 14.
 - [Peng et al., 1986](#)
 - SJ Peng, MZ Podowski, RT Lahey Jr.
 - **BWR lineaire stabiliteitsanalyse**
 - Nuclear Engineering and Design, 93 (1986), blz. 25-37
 - Loading
- 15.
 - [Penttila 2015](#)
 - S. Penttila (Ed.), 7de Internationale Symposium over superkritische watergekoelde reactoren, ISSCWR-7, 15-18 maart 2015, Helsinki, Finland, VTT Technology Report VTT 216 (2015)
 - Loading
- 16.
 - [Pilkhwal et al., 2007](#)
 - DS Pilkhwal, W. Ambrosini, N. Forgione, PK Vijayan, D. Saha, JC Ferreri
 - **Analyse van het instabiele gedrag van een enkelfasige natuurlijke circulatielus met eendimensionale en computational fluid-dynamische modellen**
 - Annals of Nuclear Energy, 34 (2007), blz. 339-355
 - Loading
- 17.
 - [Pioro en Duffey 2003](#)
 - IL Pioro, RB Duffey
 - **Literatuur Survey of Heat Transfer en hydraulische weerstand van water, kooldioxide, helium en andere vloeistoffen bij superkritische en bijna-kritische Drukken**
 - (2003) Atomic Energy van Canada Report AECL-12137, FFC-FCT-409
 - Loading
- 18.
 - [Pioro et al., 2004](#)
 - IL Pioro, HF Khartabil, RB Duffey
 - **Warmteoverdracht naar superkritische fluïda stromen in kanalen - empirische correlaties (survey)**
 - Nuclear Engineering and Design, 230 (2004), pp. 69-91
 - Loading
- 19.
 - [Pioro en Duffey 2005](#)
 - IL Pioro, RB Duffey
 - **Experimentele warmteoverdracht in superkritisch water stroomt in kanalen (survey)**
 - Nuclear Engineering and Design, 235 (2005), blz. 2407-2430
 - Loading
- 20.
 - [Prasad et al., 2007](#)
 - GVD Prasad, M. Pandey, MS Kalra
 - **Beoordeling van het onderzoek naar stromingsinstabiliteiten in natuurlijke circulatie kokend systemen**
 - Vooruitgang in Kernenergie, 49 (6) (2007), blz. 429-451
 - Loading
- 1.
 - [Planchon et al., 1985](#)

- HP Planchon, RM Singer, D. Mohr, EE Feldman, LK Chang, PR Betten
- **De EBR-II verbonden afsluiten en warmteverwijdering testen - een overzicht van testresultaten**
- paper CONF-850410-6 gepresenteerd op de International Topical Meeting on Fast Reactor Safety 21-25 april 1985, Knoxville, Tennessee (1985)
- Loading
- 2.
 - [Rao et al., 2005a](#)
 - NM Rao, B. Maiti, PK Das
 - **Vergelijking van de dynamische prestaties voor directe en vloeistof gekoppeld indirecte warmtewisseling systemen**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 48 (2005), blz. 3244-3252
 - Loading
- 3.
 - [Rao et al., 2005b](#)
 - NM Rao, B. Maiti, PK Das
 - **Dynamische prestaties van een natuurlijke circulatie lus met eind warmtewisselaars onder verschillende excitaties**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 48 (2005), blz. 3185-3196
 - Loading
- 4.
 - [Rao et al., 2005c](#)
 - NM Rao, B. Maiti, PK Das
 - **Drukvariatie in een natuurlijke circulatielus met terminale warmtewisselaars**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 48 (2005), blz. 1403-1412
 - Loading
- 5.
 - [Rao et al., 2005d](#)
 - NM Rao, B. Maiti, PK Das
 - **Stabiliteit gedrag van een natuurlijke circulatie lus met einde warmtewisselaars**
 - Journal of Heat Transfer, 127 (2005), pp. 749-756
 - Loading
- 6.
 - [Rao et al., 2008](#)
 - NM Rao, B. Maiti, PK Das
 - **Steady state prestaties van een enkele fase natuurlijke circulatie lus met einde warmtewisselaars**
 - Journal of Heat Transfer, 130 (2008), p. 084.506
 - Loading
- 7.
 - [Reden 1997](#)
 - J. Reden
 - **Het beheer van de risico's van Organizational Accidents**
 - Ashgate Publishing, Aldershot, Verenigd Koninkrijk (1997)
 - Loading
- 8.
 - [Richards et al., 1985](#)
 - DJ Richards, BN Hanna, N. Hobson, KH Ardron
 - **ATHENA, een twee-fluidum code CANDU LOCA analyse**
 - Derde Internationale Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics, Newport, Rhode Island, USA, 15-18 oktober 1985, 7E-1 tot en met 7E-14 (CATHENA voorheen genaamd ATHENA) (1985)

9.
 - Loading
 - [Rickover 1970](#)
 - HG Rickover
 - **Getuigenis, hoorzitting voor het Paritair Comité voor Atoomenergie**
 - 91e Congres, 2e Sessie, 19-20 maart (1970)
10.
 - Loading
 - [Rohatgi et al., 1994](#)
 - US Rohatgi, AN Mallen, HS Cheng, W. Wulff
 - **Validatie van de technische installatie analysator methodologie perzik bodem 2 stabiliteitstesten**
 - Nuclear Engineering and Design, 151 (1994), blz. 145-156
11.
 - Loading
 - [Rohatgi et al., 1998](#)
 - US Rohatgi, HS Cheng, HJ Khan, AN Mallen, LY Neymotin
 - **RAMONA-4B een computer code met Driedimensionale Neutron Kinetics voor BWR en SBWR System Transient - modellen en correlaties**
 - (1998) Brookhaven National Laboratory Report BNL-NUREG-52471-1
12.
 - Loading
 - [Rohatgi en Duffey 1998](#)
 - US Rohatgi, RB Duffey
 - **Stabiliteit, DNB en CHF in natuurlijke circulatie tweefasenstroming**
 - International Communications in Heat and Mass Transfer, 25 (1998), blz. 161-174
13.
 - Loading
 - [Rohde et al., 2010](#)
 - M. Rohde, CP Marcel, A. Manera, THJJ Van der Hagen, Shiralkar
 - **Onderzoek naar de ESBWR stabiliteit met experimentele en numerieke hulpmiddelen: een vergelijkende studie**
 - Nuclear Engineering and Design, 240 (2010), blz. 375-384
14.
 - Loading
 - [Rowinski et al., 2015](#)
 - MK Rowinski, TJ White, J. Zhao
 - **Kleine en middelgrote reactoren (SMR), een overzicht van de technologie**
 - Hernieuwbare en duurzame energie, Reviews 44 (2015), blz. 643-656
15.
 - Loading
 - [Ruspini et al., 2010](#)
 - LC Ruspini, CA Dorao, M. Fernandino
 - **Dynamische simulaties van Ledinegg instabiliteit**
 - Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2 (2010), blz. 211-216
16.
 - Loading
 - [Ruspini et al., 2011a](#)
 - LC Ruspini, CA Dorao, M. Fernandino
 - **Simulatie van een natuurlijke circulatie met behulp van een kleinste kwadraten hp-adaptieve oplosser**
 - Wiskunde en Informatica in Simulation, 81 (2011), blz. 2517-2528

- o Loading
17.
 - o [Ruspini et al., 2011b](#)
 - o LC Ruspini, CA Dorao, M. Fernandino
 - o **Modellering van dynamische instabiliteiten in kokend systemen**
 - o ICONE-19: 19e internationale conferentie over nucleaire techniek; Osaka (Japan); 24-25 oktober 2011, Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, Japan (2011) [3427 blz.]; 2011; [9 p.]
- o Loading
18.
 - o [Ruspini 2012](#)
 - o LC Ruspini
 - o **Inertie en samendrukbaarheid gevolgen dichtheidsgolven en Ledinegg fenomenen in twee fasen stroomsystemen**
 - o Nuclear Engineering and Design, 250 (2012), blz. 60-67
- o Loading
19.
 - o [Ruspini et al., 2012](#)
 - o LC Ruspini, CA Dorao, M. Fernandino
 - o **Tweefasen stroming instabiliteiten in kokende en condensatiesystemen**
 - o Journal of Power and Energy Systems, 6 (2) (2012), blz. 302-313
- o Loading
20.
 - o [Ruspini 2013](#)
 - o LC Ruspini
 - o **Experimentele en numerieke studie van Two-Phase Flow instabiliteiten**
 - o (Proefschrift) Noorse Universiteit voor Wetenschap en Technologie (2013)
- o Loading
1.
 - o [Ruspini et al., 2014](#)
 - o LC Ruspini, CP Marcel, A. Clausse
 - o **Tweefasenstroming instabiliteiten: een overzicht**
 - o International Journal of Heat and Mass Transfer, 71 (2014), blz. 521-548
- o Loading
2.
 - o [Sabharwall et al., 2012](#)
 - o P. Sabharwall, YJ Yoo, Q. Wu, JJ Sienicki
 - o **Circulatie en lineaire stabiliteitsanalyse voor vloeibare metaal reactoren met als gevolg fluïdum axiale geleiding**
 - o Nucleaire technologie, 178 (2012), p. 298
- o Loading
3.
 - o [Saha et al., 2013](#)
 - o P. Saha, N. Aksan, J. Anderson, J. Yan, JP Simoneau L. Leung, F. Bertrand, K. Aoto, H. Kamide
 - o **Kwesties en de toekomstige richting van thermohydraulica onderzoek en ontwikkeling in kernreactoren**
 - o Nuclear Engineering and Design, 264 (2013), blz. 3-23
- o Loading
4.
 - o [Saha, 1974](#)
 - o P. Saha
 - o **Thermisch geïnduceerde Two-Phase Flow Instabilities, inclusief de effecten van thermische niet-evenwicht tussen de fasen**

- (Proefschrift) Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia (1974)
- Loading
- 5.
 - [Saha et al., 1976](#)
 - P. Saha, M. Ishii, N. Zuber
 - **Een experimenteel onderzoek van de thermisch opgewekte stroom oscillaties in tweefasensystemen**
 - ASME Journal of Heat Transfer, 98 (1976), blz. 616-622
 - Loading
- 6.
 - [Saha en Zuber 1978](#)
 - P. Saha, N. Zuber
 - **Een analytische studie van de thermisch geïnduceerde tweefasenstroming instabiliteiten inclusief het effect van thermische non-equilibrium**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 21 (1978), blz. 415-426
 - Loading
- 7.
 - [Salazar et al., 1988](#)
 - O. Salazar, S. Mihir, E. Ramos
 - **Flow in conjugaat natuurlijke circulatie loops**
 - AIAA Journal of Thermophysics, 2 (1988), blz. 180-183
 - Loading
- 8.
 - [Sarkar et al., 2014](#)
 - MKS Sarkar, AK Tilak, DN Basu
 - **Een state-of-the-art overzicht van de recente ontwikkelingen in de superkritische natuurlijke circulatie lussen voor nucleaire toepassingen**
 - Annals of Nuclear Energy, 73 (2014), blz. 250-263
 - Loading
- 9.
 - [Sharabi et al., 2008a](#)
 - MB Sharabi, W. Ambrosini, S. Hij
 - **Voorspelling van instabiel gedrag in een verwarmd kanaal met water bij superkritische druk van CFD modellen**
 - Annals of Nuclear Energy, 35 (2008), blz. 767-782
 - Loading
- 10.
 - [Sharabi et al., 2008b](#)
 - M. Sharabi, W. Ambrosini, S. Hij, JD Jackson
 - **Voorspelling van turbulente convectieve warmteoverdracht aan een fluïdum bij superkritische druk in vierkante en driehoekige kanalen**
 - Annals of Nuclear Energy, 35 (2008), blz. 993-1005
 - Loading
- 11.
 - [Singer et al., 1980](#)
 - RM Singer, JL Gillette, D. Mohr, JV Tokar, JE Sullivan, EM Dean
 - **Reactie van EBR-II om een volledig verlies van primaire gedwongen stroming tijdens krachtige werking**
 - Meeting specialisten op nakoelstrang en Natural Convection in FBR's, Brookhaven National Laboratory Upton, Long Island, New York, 28-29 februari 1980 (1980)
 - Loading
- 12.

- [Sofu 2014](#)
- T. Sofu
- 4e IAEA-GIF Technical Meeting / Workshop voor de veiligheid van SFRS, 10-11 juni, Wenen (2014)
- Loading
- 13.
 - [Spore et al., 1981](#)
 - JW Spore, MW Giles, GL Singer, RW Shumway
 - **TRAC-BD1 / MOD1, een Advanced Best Estimate computerprogramma voor Boiling Water Reactor Transient Analyse Volume 1 Model Beschrijving**
 - (1981) Idaho National Engineering Laboratory Report, NUREG / CR-2178, EGG-2109
 - Loading
- 14.
 - [Stekelenburg 1994](#)
 - AJC Stekelenburg
 - **Statica en dynamica van een natuurlijke circulatie Gekoelde Boiling Water Reactor**
 - (Proefschrift) Technische Universiteit Delft (1994)
 - Loading
- 15.
 - [Suzuki, 2014](#)
 - A. Suzuki
 - **Het managen van de Fukushima uitdaging**
 - Risico Analysis, 34 (2014), blz. 1-17
 - Loading
- 16.
 - [Swapnalee en Vijayan 2011](#)
 - BT Swapnalee, PK Vijayan
 - **Een gegeneraliseerde debietvergelijking eenfase natuurlijke circulatielussen gehoorzamen meerdere wrijving wetten**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 54 (2011), blz. 2618-2629
 - Loading
- 17.
 - [Swapnalee et al., 2012](#)
 - BT Swapnalee, PK Vijayan, M. Sharma, DS Pilkhwal
 - **Steady state stroom en statische instabiliteit van superkritisch natuurlijke circulatie loops**
 - Nuclear Engineering and Design, 245 (2012), blz. 99-112
 - Loading
- 18.
 - [Tadrist 2007](#)
 - L. Tadrist
 - **Review op twee fasen stroming instabiliteiten in nauwe ruimtes**
 - International Journal of Heat en Fluid Flow, 28 (1) (2007), blz. 54-62
 - Loading
- 19.
 - [TEPCO 2012](#)
 - TEPCO
 - **Fukushima nucleair ongeval Analysis Report**
 - Tokyo Electric Power Company Inc. (2012)
 - Loading
- 20.
 - [Tilak en Basu, 2015](#)
 - AK Tilak, DN Basu

- **Computatieve onderzoek naar de dynamiek van een superkritisch natuurlijke circulatie lus aperiodieke en periodieke excitaties**
 - Nuclear Engineering and Design, 284 (2015), blz. 251-263
 - Loading
1.
 - [Todreas en Kazimi, 1990](#)
 - NE Todreas, MS Kazimi
 - **Nucleaire Systemen I: thermohydraulische Fundamentals en Nucleaire Systemen II: Elementen van Thermal hydraulisch ontwerp**
 - Hemisphere Publishing Corporation, New York (1990)
 - Loading
 2.
 - [Toumi et al., 2000](#)
 - I. Toumi, A. Bergeron, D. Gallo, E. Royer, D. Caruge
 - **FLICA-4: een driedimensionaal tweefasenstroming computercode geavanceerde numerieke methoden voor nucleaire toepassingen**
 - Nuclear Engineering and Design, 200 (2000), blz. 139-155
 - Loading
 3.
 - [Amerikaanse DoE 2014](#)
 - US DOE, Amerikaanse ministerie van Energie Bureau van kernenergie
 - **Geavanceerde Reactor Concepts Technical Review Panel Reportage**
 - (2014) <http://www.energy.gov/ne/downloads/advance-reactor-concepts-technical-review-panel-public-report>
 - Loading
 4.
 - [Amerikaanse DoE 2015](#)
 - US DOE, Amerikaanse ministerie van Energie Bureau van Environmental Management
 - **Accident Investigation Report, Fase 2: Radiologische vrijzettingstap bij de Waste Isolation Pilot Plant**
 - (2015) <http://energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f21/WIPP%20Rad%20Event%20Report%20Phase%202%2004.16.2015.pdf>
 - Loading
 5.
 - [US NRC, 1997](#)
 - US NRC, Verenigde Staten Nuclear Regulatory Commission
 - **Aanbevelingen voor Probabilistische Seismische Hazard Analysis: Oriëntatie op Onzekerheid en het gebruik van Experts**
 - (1997) CR-6372 UCRL-ID-122160, Vols. 1 en 2
 - Loading
 6.
 - [US NRC 2004](#)
 - US NRC, Verenigde Staten Nuclear Regulatory Commission
 - **Nuclear Power Plant Licensing Process**
 - (2004) NUREG / BR-0298, Rev. 2
 - Loading
 7.
 - [US NRC 2008](#)
 - US NRC, US Nuclear Regulatory Commission
 - **TRACE V5.0 Theory Manual, Field Vergelijkingen, Solution methoden en fysische modellen**
 - Ontwerp-verslag afdeling Risk Assessment en Special Projects, Bureau van Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2008) Pdf-bestand gemaakt op 15 augustus 2007. Beschikbaar op

NRC online document retrieval systeem ADAMS sinds February 2009 met referentie No. "ML071000097"

8.
 - o Loading
 - o [US NRC 2014](#)
 - o US NRC, Verenigde Staten Nuclear Regulatory Commission
 - o **Eindevaluatie veiligheid verslag in verband met de certificering van de economische vereenvoudigde kokendwaterreactor standaard ontwerp**
 - o (2014) NUREG-1966 ADAMS toetreding nummer ML14100A187
9.
 - o Loading
 - o [van Bragt, 1998](#)
 - o DDB van Bragt
 - o **Analytische Modelling van Boiling Water Reactor Dynamics**
 - o (Proefschrift) Technische Universiteit Delft (1998)
10.
 - o Loading
 - o [van de Graaf et al., 1994](#)
 - o R. van de Graaf, THJJ van der Hagen, RF Mudde
 - o **Tweefasen stroming schaalwetten een gesimuleerde BWR samenstel**
 - o Nuclear Engineering and Design, 148 (1994), blz. 455-462
11.
 - o Loading
 - o [van der Hagen et al., 2000](#)
 - o THJJ van der Hagen, AJC Stekelenburg, DDB van Bragt
 - o **Reactor experimenten van het type-I en type-II BWR stabiliteit**
 - o Nuclear Engineering and Design, 200 (2000), blz. 177-185
12.
 - o Loading
 - o [Vecchiarelli et al., 2014](#)
 - o J. Vecchiarelli, K. Dinnie, J. Luxat
 - o **Ontwikkeling van een Whole-Site PSA Methodologie**
 - o CANDU Owners Group (2014) COG-13-9034 r0
13.
 - o Loading
 - o [Vijayan en Nayak 2010](#)
 - o PK Vijayan, AK Nayak
 - o **Inleiding tot instabiliteiten in natuurlijke circulatie systemen**
 - o IAEA Training Course op natuurlijke circulatie Phenomena en passieve veiligheidssystemen in Advanced Water-gekoelde reactoren, ICTP, Triëst, Italië, 17-21 mei 2010 (2010)
14.
 - o Loading
 - o [Vijayan et al., 2013](#)
 - o PK Vijayan, M. Sharma, DS Pilkhwal
 - o **Steady State en stabiliteit Kenmerken van een superkritische Pressure natuurlijke circulatie Loop (SPNCL) met CO₂**
 - o (2013) Bhabha Atomic Research Centrum Report BARC / 2013/003
15.
 - o Loading
 - o [Vyas et al., 2010](#)
 - o HP Vyas, V. Venkat Raj, AK Nayak

- **Experimenteel onderzoek op steady state natuurlijke circulatie gedrag van meerdere parallelle kokende kanaalsysteem**
- Nuclear Engineering and Design, 240 (2010), blz. 3862-3867
- Loading
- 16.
 - [Walter en Linzer 2006](#)
 - H. Walter, W. Linzer
 - **De invloed van de werkdruk op de stabiliteit van natuurlijke circulatiesystemen**
 - Applied Thermal Engineering, 26 (2006), blz. 892-897
 - Loading
- 17.
 - [Welanders 1967](#)
 - P. Welanders
 - **De oscillerende instabiliteit van een differentieel verwarmd fluïdum**
 - Journal of Fluid Mechanics, 29 (1967), blz. 17-30
 - Loading
- 18.
 - [Wenbin et al., 2014](#)
 - Z. Wenbin, H. Yanping, X. Zejun, P. Chuanxin, L. Sansan
 - **Experimenteel onderzoek naar passieve resterende hitteverwijderingssysteem van de Chinese geavanceerde PWR**
 - Wetenschap en Technologie van nucleaire installaties, 2014 (2014) Artikel ID 325356, 8 p
 - Loading
- 19.
 - [WENRA 2009](#)
 - WENRA, Western European Nuclear Regulators Association
 - **Veiligheid Doelstellingen voor nieuwe kernreactoren**
 - Een studie van de WENRA Reactor harmonisatie Working Group (2009), blz. 9-10
 - Loading
- 20.
 - [WENRA 2014](#)
 - WENRA, Western European Nuclear Regulators Association
 - **Safety referentieniveau voor bestaande reactoren**
 - (2014) Verkrijgbaar bij: <http://www.wenra.org/harmonisation/reactor-harmonisation-working-group>
 - Loading
- 1.
 - [Whittle en Forgan 1967](#)
 - RH Whittle, R. Forgan
 - **Een correlatie van de minima in de drukval versus debiet curves voor onderkoelde water stroomt in smalle kanalen verwarmd**
 - Nuclear Engineering and Design, 6 (1967), blz. 89-99
 - Loading
- 2.
 - [Wissler et al., 1956a](#)
 - EH Wissler, HS Isbin, NR Amundson
 - **De oscillerende gedrag van een tweefasig natuurlijke circulatielus**
 - Gepresenteerd op de Nuclear Engineering and Science Congress, Cleveland, Ohio (1956) AIChE Prepress-59, 1955. Zie ook American Institute of Chemical Engineers Journal, 2, 157-162
 - Loading
- 3.
 - [Wissler et al., 1956b](#)
 - EH Wissler, HS Isbin, NR Amundson

- **Oscillerend gedrag van een tweefasig natuurlijke circulatielus**
- AIChE Journal, 2 (1956), blz. 157-162
- Loading
- 4.
 - [Woffinden en Niemi, 1981](#)
 - FB Woffinden, RO Niemi
 - **Low-Flow Stability Tests bij Peach Bottom Atomic Power Station Unit 2 tijdens cyclus 3**
 - (1981) Electric Power Research Institute Report NP-972
 - Loading
- 5.
 - [Wu 2011](#)
 - Y. Wu
 - **Aan het modelleren en regelen van gekoppelde multi-loop thermosyphons**
 - Toepassingen van Wiskunde en Informatica Engineering, 2011 Amerikaanse conferentie over Applied Mathematics (2011), blz. 105-110
 - Loading
- 6.
 - [Wulff et al., 1992](#)
 - W. Wulff, HS Cheng, AN Mallen, US Rohatgi
 - **BWR Stabiliteitsanalyse met de BNL engineering Plant Analyzer**
 - (1992) Brookhaven National Laboratory Report NUREG / CR-5816; BNL-NUREG-52312
 - Loading
- 7.
 - [Xiong et al., 2013](#)
 - T. Xiong, X. Yan, S. Huang, J. Yu, Y. Huang
 - **Modellering en analyse van superkritische stroming instabiliteit in parallelle kanalen**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 57 (2013), blz. 549-557
 - Loading
- 8.
 - [Xiong et al., 2012](#)
 - T. Xiong, X. Yan, ZJ Xiao, YL Li, YP Huang, JC Yu
 - **Experimenteel onderzoek naar stromingsinstabiliteit parallel kanalen met superkritisch water**
 - Annals of Nuclear Energy, 48 (2012), blz. 60-67
 - Loading
- 9.
 - [Xu et al., 2009](#)
 - Y. Xu, T. Downar, R. Walls, K. Ivanov, J. Staudenmeier, J. March-Lueba
 - **Toepassing van TRACE / PARCS te BWR stabiliteitsanalyses**
 - Annals of Nuclear Energy, 36 (2009), blz. 317-323
 - Loading
- 10.
 - [Yadav et al., 2012a](#)
 - AK Yadav, MR Gopal, S. Bhattacharyya
 - **CFD analyses van CO2 gebaseerde natuurlijke circulatielus met terminale warmtewisselaars**
 - Applied Thermal Engineering, 36 (2012), blz. 288-295
 - Loading
- 11.
 - [Yadav et al., 2012b](#)
 - AK Yadav, MR Gopal, S. Bhattacharyya

- **CO₂ op basis van natuurlijke circulatie loops, nieuwe correlaties voor wrijving en warmteoverdracht**
- International Journal of Heat and Mass Transfer, 55 (2012), blz. 4621-4630
- Loading
- 12.
 - [Yadigaroglu en Bergles 1969](#)
 - G. Yadigaroglu, AE Bergles
 - **Een experimentele en theoretische studie van Density-Wave Oscillatie in Two-Phase Flow**
 - (1969) Massachusetts Institute of Technology Report DSR 74629-3
 - Loading
- 13.
 - [Yang et al., 2008](#)
 - SH Yang, Y.-J. Chung, K.-K. Kim
 - **Experimentele validatie van de TASS / SMR coderen voor een integrale Type drukwaterreactor**
 - Annals of Nuclear Energy, 35 (2008), blz. 1903-1911
 - Loading
- 14.
 - [Yetisir et al., 2015](#)
 - M. Yetisir, M. Gaudet, R. Duffey
 - **Supersafe © Reactor (SSR): een superkritische watergekoelde reactor small**
 - Proceedings van de 22e International Technical Meeting on Small Modulaire reactoren, Canadian Nuclear Society, Ottawa, Canada 7-09 november (2015)
 - Loading
- 15.
 - [Yu et al., 2015](#)
 - L. Yu, A. Sur, D. Liu
 - **Flow het kookpunt en tweefasenstroming instabiliteit van nanovloeistoffen in een minichannel**
 - Journal of Heat Transfer, 137 (2015) <http://dx.doi.org/10.1115/1.4029647> Paper nr: HT-14-1408
 - Loading
- 16.
 - [Zhang et al., 2010](#)
 - X.-R. Zhang, L. Chen, H. Yamaguchi
 - **Convectieve stroming en warmteoverdracht superkritisch CO₂ in een rechthoekige natuurlijke circulatielus**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 (2010), blz. 4112-4122
 - Loading
- 17.
 - [Zhao et al., 2014](#)
 - M. Zhao, HY Gu, X. Cheng
 - **Experimentele studie warmteoverdracht superkritisch water naar beneden stroomt in ronde buizen**
 - Annals of Nuclear Energy, 63 (2014), blz. 339-349
 - Loading
- 18.
 - [Zvirin 1979](#)
 - Y. Zvirin
 - **Het effect van dissipatie op vrije convectie loops**
 - International Journal of Heat and Mass Transfer, 22 (1979), blz. 1539-1545
 - Loading
- 19.
 - [Zvirin 1982](#)

- Y. Zvirin
- **Een overzicht van de natuurlijke circulatie lussen in drukwaterreactoren en andere systemen**

- Nuclear Engineering and Design, 67 (1982), blz. 203-225

- Loading

20.

- [Zvirin 1985](#)

- Y. Zvirin

- **De instabiliteit in verband met het begin van de beweging in een thermosifon**

- International Journal of Heat and Mass Transfer, 28 (1985), blz. 2105-2111

- Loading

1.

- [Zvirin et al., 1981](#)

- Y. Zvirin, PR Jeuck III, CW Sullivan, RB Duffey

- **Experimenteel en analytisch onderzoek van een natuurlijk circulatiesysteem met parallelle lussen**

- Journal of Heat Transfer, 103 (1981), blz. 645-652

- Loading

Copyright © 2016 Elsevier Ltd Alle rechten voorbehouden.