

**VERBUNDPROJEKT WASA-BOSS:
WEITERENTWICKLUNG UND ANWENDUNG
VON SEVERE ACCIDENT CODES – BEWERTUNG
UND OPTIMIERUNG VON STÖRFALLMASSNAHMEN**

**TEILPROJEKT B:
DRUCKWASSERREAKTOR-STÖRFALLANALYSEN
UNTER VERWENDUNG DES SEVERE-ACCIDENT-
CODES ATHLET-CD**

M. Jobst, S. Kliem, Y. Kozmenkov, P. Wilhelm

M. Jobst, S. Kliem, Y. Kozmenkov, P. Wilhelm

**VERBUNDPROJEKT WASA-BOSS:
WEITERENTWICKLUNG UND ANWENDUNG
VON SEVERE ACCIDENT CODES – BEWERTUNG
UND OPTIMIERUNG VON STÖRFALLMASSNAHMEN**

**TEILPROJEKT B:
DRUCKWASSERREAKTOR-STÖRFALLANALYSEN
UNTER VERWENDUNG DES SEVERE-ACCIDENT-
CODES ATHLET-CD**

HZDR

Druckausgabe: ISSN 2191-8708

Elektronische Ausgabe: ISSN 2191-8716

Die elektronische Ausgabe erscheint unter Creative Commons License (CC BY 4.0):

<https://www.hzdr.de/publications/Publ-25233>

<urn:nbn:de:bsz:d120-qucosa-219891>

2017

Herausgegeben vom

Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf

Bautzner Landstraße 400

01328 Dresden

Germany

Abschlussbericht / Final Report

Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr./
Reactor Safety Research-project No.:

02NUK028B

Vorhabentitel: **Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt B: Druckwasserreaktor-Störfallanalysen unter Verwendung des Severe-Accident-Codes ATHLET-CD**

Project Title: **Joint Research Project WASA-BOSS: Further Development and Application of Severe Accident Codes – Assessment and Optimization of Accident Management Measures; Project B: Accident Analyses for Pressurized Water Reactors with the Application of the ATHLET-CD Code**

Autoren / Author(s): **M. Jobst
S. Kliem
Y. Kozmenkov
P. Wilhelm**

Dienststelle der Autoren /
Performing Organization: **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Institut für Ressourcenökologie**

Berichtsdatum / Publication Date: **Februar 2017**

Berichts-Nr. / Report-No.: **HZDR-080**



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02NUK028B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt B: Druckwasserreaktor-Störfallanalysen unter Verwendung des Severe-Accident-Codes ATHLET-CD	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Jobst, Matthias, Kliem, Sören, Kozmenkov, Yaroslav, Wilhelm, Polina	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2016
	6. Veröffentlichungsdatum Februar 2017
	7. Form der Publikation Broschüre
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) Institut für Ressourcenökologie Abteilung Reaktorsicherheit Postfach 510119 01314 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution HZDR-080
	10. Förderkennzeichen 02NUK028B
	11. Seitenzahl 124
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung 53170 Bonn	13. Literaturangaben 60
	14. Tabellen 17
	15. Abbildungen 118
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Innerhalb des Vorhabens wurde ein ATHLET-CD-Eingabedatensatz für einen generischen deutschen DWR vom Typ KONVOI entwickelt. Das ATHLET-CD-Modell wurde für die Simulation schwerer Störfälle aus den Störfallkategorien Station Blackout (SBO) und Kühlmittelverluststörfällen mit kleinen Lecks (SBLOCA) eingesetzt. Dabei ist die vollständige Störfalltransiente für den Zeitbereich zwischen dem einleitenden Ereignis bis zum Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) abgedeckt und alle wesentlichen Phänomene schwerer Störfällen werden abgebildet: Beginn der Kernaufheizung, Spaltproduktfreisetzung, Aufschmelzen von Brennstoff- und Absorbermaterialien, Oxidationsprozesse mit Freisetzung von Wasserstoff, Verlagerung von geschmolzenem Material, Verlagerung in das untere Plenum, Schädigung und Versagen des RDB. Das Modell wurde für die Analyse möglicher präventiver und mitigativer Notfallmaßnahmen für SBO und SBLOCA angewandt. Dafür wurden die Notfallmaßnahmen primärseitige Druckentlastung (PDE), primärseitiges Einspeisen mit mobilen Pumpensystemen sowie für SBLOCA das verzögerte Einspeisen der kaltseitigen Druckspeicher untersucht und die Eigenschaften und Einleitkriterien der Maßnahmen variiert. Es wurden die Zeitverläufe der Unfallszenarien analysiert und die verbleibenden Zeitspannen für die Einleitung zusätzlicher Maßnahmen ermittelt. Für ein SBO-Szenario mit PDE wurde für die Frühphase der Transiente (bis zum Beginn der Kernschmelze) eine Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Zusätzlich wurde für ein SBLOCA-Szenario ein Code-zu-Code-Vergleich zwischen ATHLET-CD und dem Störfallcode MELCOR erarbeitet.	
19. Schlagwörter Druckwasserreaktor, Schwere Störfälle, Notfallmaßnahmen, ATHLET-CD-Simulation	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Joint Research Project WASA-BOSS: Further Development and Application of Severe Accident Codes – Assessment and Optimization of Accident Management Measures; Project B: Accident Analyses for Pressurized Water Reactors with the Application of the ATHLET-CD Code	
4. author(s) (family name, first name(s)) Jobst, Matthias, Kliem, Sören, Kozmenkov, Yaroslav, Wilhelm, Polina	5. end of project 31.08.2016
	6. publication date February 2017
	7. form of publication Booklet
8. performing organization(s) (name, address) Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) Institut für Ressourcenökologie Abteilung Reaktorsicherheit Postfach 510119 01314 Dresden	9. originator's report no. HZDR-080
	10. reference no. 02NUK028B
	11. no. of pages 124
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung 53170 Bonn	13. no. of references 60
	14. no. of tables 17
	15. no. of figures 118
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Within the framework of the project an ATHLET-CD input deck for a generic German PWR of type KONVOI has been created. This input deck was applied to the simulation of severe accidents from the accident categories station blackout (SBO) and small-break loss-of-coolant accidents (SBLOCA). The complete accident transient from initial event at full power until the damage of reactor pressure vessel (RPV) is covered and all relevant severe accident phenomena are modelled: start of core heat up, fission product release, melting of fuel and absorber material, oxidation and release of hydrogen, relocation of molten material inside the core, relocation to the lower plenum, damage and failure of the RPV. The model has been applied to the analysis of preventive and mitigative accident management measures for SBO and SBLOCA transients. Therefore, the measures primary side depressurization (PSD), injection to the primary circuit by mobile pumps and for SBLOCA the delayed injection by the cold leg hydro-accumulators have been investigated and the assumptions and start criteria of these measures have been varied. The time evolutions of the transients and time margins for the initiation of additional measures have been assessed. An uncertainty and sensitivity study has been performed for the early phase of one SBO scenario with PSD (until the start of core melt). In addition to that, a code-to-code comparison between ATHLET-CD and the severe accident code MELCOR has been carried out.	
19. keywords PWR, Severe accidents, Accident management measures, ATHLET-CD simulations	
20. publisher	21. price

Inhalt

Liste der Abkürzungen	9
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	16
1 Einleitung	17
2. Projektdurchführung	18
2.1 Einordnung in das Verbundvorhaben, Zeitplan und Meilensteine.....	18
2.2 Projekttreffen mit HZDR-Beteiligung	20
2.3 Berichte und Veröffentlichungen.....	21
2.4 Durchgeführte Arbeiten innerhalb der Arbeitspakete	22
2.4.1 Arbeitspaket 1 (TPB-AP1): Durchführung von Störfallanalysen.....	22
2.4.2 Arbeitspaket 2 (TPB-AP2): Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen für DWR.....	23
3. ATHLET-Parameterstudie zu einem kleinen Leck	24
4. ATHLET-CD-Modell eines generischen KONVOI	29
4.1 Anlagenmodell und Thermohydraulik.....	29
4.2 Modellierung der Kerndegradationsprozesse	32
4.2.1 Core-Degradation-Modul (CW ECOREMOD)	32
4.2.2 Quench-Front-Modul (CW QUENCHCORE).....	41
4.2.3 Modul OREST.....	42
4.2.4 Modul FIPISO	43
4.2.5 Modul der Spaltproduktfreisetzung (CW FIPREM).....	44
4.2.6 Modul zur Simulation der Prozesse im unteren Plenum (CW AIDA).....	45
5. Detaillierte Analyse ausgewählter Störfallszenarien	48
5.1 Stationäre Lösung des Modells.....	49
5.2 Simulationen zu Kühlmittelverluststörfällen mit kleinem Leck (SBLOCA).....	53
5.2.1 Definition der Szenarien.....	53
5.2.2 Ergebnisse der Simulationen mit ATHLET-CD 3.0A	53
5.3 Simulationen zu Station-Blackout-Störfällen (SBO)	63
5.3.1 Definition der Szenarien.....	63
5.3.2 Ergebnisse der Simulationen mit ATHLET-CD 3.0A.....	64
6. Unsicherheits- und Sensitivitätsstudie für die Frühphase eines SBO-Szenarios	72

7.	Code-zu-Code-Vergleich zwischen ATHLET-CD und MELCOR	74
7.1	Einleitung	74
7.2	Kurzbeschreibung des MELCOR-Modells	74
7.3	Ergebnisse des Code-zu-Code-Vergleichs	76
8.	Analyse von Notfallmaßnahmen für den generischen KONVOI	81
8.1	Überblick zu möglichen Notfallmaßnahmen.....	81
8.2	Bestimmung der minimal notwendigen Einspeiseraten.....	81
8.3	Anwendung von Notfallmaßnahmen im SBO-Fall.....	85
8.3.1	Überblick über die durchgeführten Simulationsrechnungen.....	85
8.3.2	Wesentliche Ergebnisse	87
8.4	Anwendung von Notfallmaßnahmen für SBLOCA-Szenarien	98
8.4.1	Überblick über die durchgeführten Simulationen	98
8.4.2	Primärkreiseinspeisung mit mobilem Pumpensystem.....	100
8.4.3	Zeitlich verzögertes Einspeisen der kaltseitigen Druckspeicher.....	106
9.	Empfehlungen für Code-Verbesserungen	112
10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	114
11.	Literatur	118
	Danksagung	123

Liste der Abkürzungen

AIDA	ATHLET-CD-Modul für die Simulation der Phänomene im unteren Plenum
AMM	Accident management measures (Notfallmaßnahmen)
ATHLET(-CD)	Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten (mit Kernzerstörung)
AP	Arbeitspaket
ASTOR	Approximated Structural Time Of Rupture
BE	Brennelement
BAT	Brennelementaustrittstemperatur
BOC	Begin of cycle (Anfang eines Betriebszyklus)
CCO	Cross connection object (Querverbindung zwischen zwei parallelen TFO)
CDR1D	Eindimensionales Modell des kritischen Ausströmens
CL	Cold leg (kalter Strang)
CV	Control volume (Kontrollvolumen)
CW	Control Word (Kontrollwort zur Strukturierung des ATHLET(-CD)-Eingabedatensatzes)
DE	Dampferzeuger
DG	Dieselmotor
d. h.	das heißt
DH	Druckhalter
DS	Druckspeicher
DWR	Druckwasserreaktor
EOC	End of cycle (Ende eines Betriebszyklus)
FB	Flutbecken
FP	Fission products (Spaltprodukte), Feuerlöschpumpe
GCSM	General-control-simulation-Modul des Programmcodes ATHLET
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
HA	Hydro-accumulator (Druckspeicher)
HD	Hochdruck
HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
HL	Hot leg (heißer Strang)
HPIS	High pressure injection system (HD-Einspeisesystem)
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
ID	Inputdeck (Eingabedatensatz)
IKE	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KIT-IFRT	Institut für Fusionstechnologie und Reaktortechnik am KIT
KIT-IKET	Institut für Kern- und Energietechnik am KIT

KIT-INR	Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik am KIT
KMV	Kühlmittelverlust
LEE	Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft an der RUB
LP	Lower plenum (unteres Plenum)
LPIS	Low pressure injection system (ND-Einspeisesystem)
MELCOR	Melting Core (Programmcode der NRC zur Analyse von Kernreaktorstörfällen)
n/a	not available (nicht verfügbar, nicht auswertbar)
ND	Niederdruck
NKV	Notkühlvorbereitung
NZW	Nachzerfallswärme
PDE	Primärkreisdruckentlastung
PSD	Primary side depressurization = Primärkreisdruckentlastung
PW	Pseudo keyword (Pseudoschlüsselwort zur Strukturierung des ATHLET(-CD)-Eingabedatensatzes)
RDB	Reaktordruckbehälter
RESA	Reaktorschnellabschaltung
RPV	Reactor pressure vessel (Reaktordruckbehälter)
RSK	Reaktorsicherheitskommission
RUB	Ruhruniversität Bochum
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SAMG	Severe accident management guidelines
SBLOCA	Small break LOCA (Kühlmittelverluststörfall mit kleinem Leck)
SBO	Station Blackout
SDE	Sekundärseitige Druckentlastung
SG	Steam generator (Dampferzeuger)
SP	Spaltprodukte
SSC	Steady state calculation (Berechnung der stationären Lösung)
SUSA	Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse
TDV	Time dependent volume (Spezielles ATHLET-Kontrollvolumen mit vorgegebenen Druck-Enthalpie-Bedingungen)
TFD	Thermofluiddynamik
TFO	Thermofluidobjekt
TPB	Teilprojekt B
u. a.	unter anderem
UP	Upper plenum (oberes Plenum)
WASA-BOSS	Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen
WÜ	Wärmeübergang
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Störfallablauf und Gegenmaßnahmen beim kleinen Leck für einen generischen DWR	25
Abb. 3.2:	RDB-Füllstand für die Simulationen zum kalt- und heißseitigen kleinen Leck	28
Abb. 3.3:	Brennstabhüllrohrtemperaturen für die Simulationen zum kalt- und heißseitigen kleinen Leck	28
Abb. 3.4:	Primärdruck für die Simulationen zum kalt- und heißseitigen kleinen Leck	28
Abb. 4.1:	Nodalisierungsschema für den generischen DWR vom Typ KONVOI	30
Abb. 4.2:	Nodalisierungsschema für den Reaktordruckbehälter mit dem in parallele Kanäle unterteilten Reaktorkern und axiale Leistungsverteilung, Aufteilung des Kerns in die 6 Ringe	32
Abb. 4.3:	Relative Strömungsquerschnittsfläche für radiale und axiale Strömung, berechnet durch das Blockademodell für den generischen KONVOI	38
Abb. 4.4:	Im Eingabedatensatz des generischen KONVOI für das ECORE-Modul spezifizierte Temperaturen	41
Abb. 4.5:	Nodalisierung des unteren Plenums innerhalb des AIDA-Moduls	46
Abb. 5.1:	Stationärer Zustand. Kernleistung und DE-Leistung	50
Abb. 5.2:	Stationärer Zustand. Druck im Primärkreis	50
Abb. 5.3:	Stationärer Zustand. Druckhalterfüllstand	50
Abb. 5.4:	Stationärer Zustand. Drehzahl der HKMP	50
Abb. 5.5:	Stationärer Zustand. Massenstrom in den kalten Strängen	50
Abb. 5.6:	Stationärer Zustand. RDB-Eintrittstemperaturen	50
Abb. 5.7:	Stationärer Zustand. RDB-Austrittstemperaturen	51
Abb. 5.8:	Stationärer Zustand. Hüllrohrtemperaturen in den 6 Kernsektionen....	51
Abb. 5.9:	Stationärer Zustand. Dampferzeugerdruck.....	51
Abb. 5.10:	Stationärer Zustand. Dampferzeugerfüllstand	51
Abb. 5.11:	Stationärer Zustand. Speisewassermassenströme und Frischdampfmassenströme	51
Abb. 5.12:	Stationärer Zustand. Zeitschrittweite der Simulation	51
Abb. 5.13:	SBLOCA-Simulationen. Kernleistung und DE-Leistung.....	59
Abb. 5.14:	SBLOCA-Simulationen. Massenströme in den kalten Strängen	59
Abb. 5.15:	SBLOCA-Simulationen. Primärkreisdruck	59
Abb. 5.16:	SBLOCA-Simulationen. Sekundärseitige Drücke	59
Abb. 5.17:	SBLOCA-Simulationen. Leckmassenstrom	59

Abb. 5.18:	SBLOCA-Simulationen. Kühlmittelmasseverlust durch das Leck	59
Abb. 5.19:	SBLOCA-Simulationen. Massenstrom HD-Einspeisung	60
Abb. 5.20:	SBLOCA-Simulationen. Massenstrom ND-Einspeisung	60
Abb. 5.21:	SBLOCA-Simulationen. Flutbeckenfüllstand	60
Abb. 5.22:	SBLOCA-Simulationen. Druckspeicherfüllstände	60
Abb. 5.23:	SBLOCA-Simulationen. Dampferzeugerfüllstände	60
Abb. 5.24:	SBLOCA-Simulationen. Füllstand im Druckhalter	60
Abb. 5.25:	SBLOCA-Simulationen. RDB-Füllstand	61
Abb. 5.26:	SBLOCA-Simulationen. Kernaustrittstemperatur	61
Abb. 5.27:	SBLOCA-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der inneren Kernsektion	61
Abb. 5.28:	SBLOCA-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der äußeren Kernsektion	61
Abb. 5.29:	SBLOCA-Simulationen. Akkumulierte Masse an Wasserstoff	61
Abb. 5.30:	SBLOCA-Simulationen. Freigesetzte Mengen an Spaltprodukten	61
Abb. 5.31:	SBLOCA-Simulationen. Masse geschmolzenen Kernmaterials und keramischer Schmelze sowie in das LP verlagerte Masse	62
Abb. 5.32:	SBLOCA-Simulationen. Volumen und Höhe des Schmelzepools im LP	62
Abb. 5.33:	SBLOCA-Simulationen. NZW im unteren Plenum , Wärmeabgabe des Schmelzepools an die Wasserschicht und RDB-Wand	62
Abb. 5.34:	SBLOCA-Simulationen. Temperatur des Schmelzepools	62
Abb. 5.35:	SBLOCA-Simulationen. Dampfgehalt im unteren Plenum	62
Abb. 5.36:	SBLOCA-Simulationen. Maximale RDB-Wandtemperaturen	62
Abb. 5.37:	SBLOCA-Simulationen. Schädigungsfaktor der RDB-Wand in dem Node mit frühestem Versagen	63
Abb. 5.38:	SBLOCA-Simulationen. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität	63
Abb. 5.39:	SBO-Simulationen. Kernleistung und DE-Leistung	68
Abb. 5.40:	SBO-Simulationen. Primärkreisdruck	68
Abb. 5.41:	SBO-Simulationen. Dampferzeugerfüllstände	68
Abb. 5.42:	SBO-Simulationen. Sekundärseitige Drücke	68
Abb. 5.43:	SBO-Simulationen. Massenströme in den DH-Ventilen	68
Abb. 5.44:	SBO-Simulationen. Massenströme in den kalten Strängen	68
Abb. 5.45:	SBO-Simulationen. Druckspeicherfüllstände	69
Abb. 5.46:	SBO-Simulationen. Füllstand im Druckhalter	69
Abb. 5.47:	SBO-Simulationen. RDB-Füllstand	69
Abb. 5.48:	SBO-Simulationen. Kernaustrittstemperatur	69

Abb. 5.49:	SBO-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der inneren Kernsektion.....	69
Abb. 5.50:	SBO-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der äußeren Kernsektion	69
Abb. 5.51:	SBO-Simulationen. Akkumulierte Masse an Wasserstoff.....	70
Abb. 5.52:	SBO-Simulationen. Freigesetzte Mengen an Spaltprodukten	70
Abb. 5.53:	SBO-Simulationen. Masse geschmolzenen Kernmaterials und keramischer Schmelze sowie in das LP verlagerte Masse.....	70
Abb. 5.54:	SBO-Simulationen. Volumen und Höhe des Schmelzepools im LP	70
Abb. 5.55:	SBO-Simulationen. NZW im unteren Plenum , Wärmeabgabe des Schmelzepools an die Wasserschicht und RDB-Wand	70
Abb. 5.56:	SBO-Simulationen. Temperatur des Schmelzepools.....	70
Abb. 5.57:	SBO-Simulationen. Dampfgehalt im unteren Plenum.....	71
Abb. 5.58:	SBO-Simulationen. Maximale RDB-Wandtemperaturen	71
Abb. 5.59:	SBO-Simulationen. Schädigungsfaktor der RDB-Wand in dem Node mit frühestem Versagen.....	71
Abb. 5.60:	SBO-Simulationen. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität.....	71
Abb. 7.1:	Nodalisierungsschema des generischen KONVOI-MELCOR-Modells	75
Abb. 7.2:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Kernleistung und DE-Leistung.....	79
Abb. 7.3:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Primärkreisdruck	79
Abb. 7.4:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Leckmassenstrom	79
Abb. 7.5:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Integral des Leckmassenstroms (Gesamtmassenverlust).....	79
Abb. 7.6:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Massenstrom der HD-Sicherheitseinspeisung.....	79
Abb. 7.7:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Einspeisemassenstrom der ND-Not- und Nachkühlpumpen	79
Abb. 7.8:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Flutbeckenfüllstand	80
Abb. 7.9:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Füllstand der heißseitigen Druckspeicher	80
Abb. 7.10:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. RDB-Füllstand	80
Abb. 7.11:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Maximale Brennstofftemperatur im Kern.....	80
Abb. 7.12:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Kumulierte Masse freigesetzten Wasserstoffs	80
Abb. 7.13:	Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Schmelze-/Debrismassen im Kern und Masse an in das LP verlagerten Kernmaterials.....	80

Abb. 8.1:	Schema für die Anwendung von Notfallmaßnahmen in Leckstörfällen sowie beim Station Blackout und beim Totalausfall der Speisewasserversorgung für einen generischen DWR vom Typ KONVOI	81
Abb. 8.2:	Minimale Einspeiserate zur Abfuhr der NZW durch Aufheizung bis Sättigungstemperatur (W_{sat}), mit vollständiger Verdampfung (W_{vap}), durch Aufheizung und Verdampfung sowie durch Aufheizung, Verdampfung und Dampfüberhitzung	83
Abb. 8.3:	SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustrittstemperaturen. Masse geschmolzenen Kernmaterials	87
Abb. 8.4:	SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustrittstemperaturen. RDB-Schädigungsfaktor	87
Abb. 8.5:	SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustrittstemperaturen. Maximale Brennstofftemperatur	88
Abb. 8.6:	SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustrittstemperaturen. Freigesetzte Aktivität (innerhalb des RDB)	88
Abb. 8.7:	SBO mit Anwendung der PDE bei BAT 400 °C und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. Masse des geschmolzenen Kernmaterials	89
Abb. 8.8:	SBO mit Anwendung der PDE bei BAT 400 °C und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. RDB-Schädigungsfaktor	89
Abb. 8.9:	SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen BAT. Masse des freigesetzten H ₂	90
Abb. 8.10:	SBO mit Anwendung der PDE bei BAT = 400 °C und Einspeisung eines mobilen Pumpensystems. Masse des freigesetzten H ₂	90
Abb. 8.11:	SBO mit Anwendung der PDE bei BAT = 400 °C und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. Freigesetzte Aktivität (innerhalb des RDB)	90
Abb. 8.12:	SBO mit Anwendung der PDE bei BAT = 400 °C und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. Primärkreisdruck	90
Abb. 8.13:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Einspeisemassenstrom	92
Abb. 8.14:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. RDB-Füllstand	92
Abb. 8.15:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Schmelzmasse	92
Abb. 8.16:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Freisetzung von Wasserstoff	92
Abb. 8.17:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Einspeisemassenstrom	93
Abb. 8.18:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. RDB-Füllstand	93

Abb. 8.19:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Schmelzmasse	93
Abb. 8.20:	SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Schädigung des RDB	93
Abb. 8.21:	SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. RDB-Füllstand.....	100
Abb. 8.22:	SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Masse geschmolzenen Kernmaterials.....	100
Abb. 8.23:	SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Maximaler RDB-Schädigungsfaktor in der unteren Kugelkalotte.....	102
Abb. 8.24:	SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Masse an freigesetztem H ₂	102
Abb. 8.25:	SBLOCA Fall 1b. Primärkreisdruckentlastung bei BAT = 400 °C und Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. RDB-Füllstand.....	102
Abb. 8.26:	SBLOCA Fall 1b. Primärkreisdruckentlastung bei BAT = 400 °C und Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Masse geschmolzenen Kernmaterials	102
Abb. 8.27:	SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität	103
Abb. 8.28:	SBLOCA Fall 1b. Primärkreisdruckentlastung bei BAT = 400 °C und Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität	103
Abb. 8.29:	SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Füllstand	108
Abb. 8.30:	SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Masse geschmolzenen Kernmaterials.....	108
Abb. 8.31	SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Schädigungsfaktor	108
Abb. 8.32	SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Freigesetzte Menge H ₂	108
Abb. 8.33:	SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Füllstand	109
Abb. 8.34:	SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Masse geschmolzenen Kernmaterials ...	109
Abb. 8.35	SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Schädigungsfaktor	109
Abb. 8.36	SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Freigesetzte Menge H ₂	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Balkenplan des Verbundvorhabens mit erfolgter Projektverlängerung	19
Tabelle 2.2: Zeitplan der Arbeitspakete und der erreichten Meilensteine.....	20
Tabelle 3.1: Parameterstudie für ein 50-cm ² -Leck –Simulationsmatrix	26
Tabelle 4.1: Implementierte Brenn- und Steuerstabgeometrie.....	35
Tabelle 5.1: Mit ATHLET-CD berechnete Szenarien für den generischen KONVOI	48
Tabelle 5.2: ATHLET-CD-Rechnung für den generischen KONVOI. Vergleich der stationären Lösung mit Anlagendaten	52
Tabelle 5.3: Wesentliche Ereignisse während der SBLOCA-Szenarien.....	58
Tabelle 5.4: Wesentliche Ereignisse während der SBO-Szenarien.....	67
Tabelle 7.1: Vergleich zwischen ATHLET-CD 3.0A und MELCOR 1.8.6 für ein ausgewähltes SBLOCA-Szenario (Fall 1b). Zusammenstellung der wesentlichen Ereignisse	78
Tabelle 8.1: Notwendige Einspeiseraten für 3 verschiedene Störfallzustände ($p_{\text{primär}} = 1$ bar) und daraus resultierende Dauer bis zur Entleerung der verbliebenen Flutbecken	85
Tabelle 8.2: SBO-Simulationsmatrix	86
Tabelle 8.3: SBO. Wesentliche Ereignisse.....	95
Tabelle 8.4: Simulationsmatrix für SBLOCA-Szenario mit und ohne Anwendung von Notfallmaßnahmen.....	99
Tabelle 8.5: Wesentliche Ereignisse für Szenarien des Typs SBLOCA Fall 1b mit Primärkreiseinspeisung durch mobiles Pumpensystem.....	104
Tabelle 8.6: Vergleich der Kernnodalisierung in Abhängigkeit vom Parameter NDIVCO	106
Tabelle 8.7: Szenarien vom Typ SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Kriterien für das Wiedereinschalten der kaltseitigen DS	107
Tabelle 8.8: Wesentliche Ereignisse für Szenarien des Typs SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher	110

1. Einleitung

Die Analyse von schweren Störfällen ist ein wichtiger Bestandteil der Reaktorsicherheitsforschung. Der Reaktorunfall in Fukushima hat deutlich gezeigt, wie wichtig ein effektives Notfallmanagement ist, um die Auswirkungen von Störfällen mit Mehrfachversagen von Sicherheitssystemen zu begrenzen. Die gezielte Anwendung von Notfallmaßnahmen setzt ein verbessertes Verständnis der im Störfallverlauf auftretenden thermohydraulischen, physikalischen und mechanischen Phänomene voraus. Für Ereignisablaufanalysen zu schweren Störfallsequenzen werden sowohl System- als auch Integralcodes eingesetzt. Die Entwicklung dieser Rechenprogramme zielt einerseits auf eine möglichst genaue Simulation von Störfallszenarien, andererseits sollen Notfallmaßnahmen zur Störfallbeherrschung entwickelt, bewertet und optimiert werden.

Das vorliegende, am HZDR, Institut für Ressourcenökologie, Abteilung für Reaktorsicherheit bearbeitete Forschungsvorhaben ist in diesen Schwerpunkt der Reaktorsicherheitsforschung eingeordnet. In diesem Forschungsvorhaben wurden sowohl die physikalischen Modelle und die Datenbasis des Störfallcodes ATHLET-CD an Hand der Ergebnisse von Störfallanalysen bewertet als auch das Verhalten der Reaktoranlage im Verlauf von schweren Störfällen analysiert. Zusätzlich wurden die Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen in der Früh- und Spätphase vor einem RDB-Versagen sowie die hierfür heranzuziehenden Einleitungskriterien für einen generischen deutschen Druckwasserreaktor untersucht und analysiert. Ein wichtiges Ziel ist die Ermittlung der maximalen Zeitspanne, die für Maßnahmen und Entscheidungen des Personals zur Verfügung steht, um die Störfallfolgen abzumildern. Dabei wurden verschiedene Möglichkeiten für Gegenmaßnahmen vor einem RDB-Versagen analysiert.

Die entsprechenden Analysen wurden dabei mit dem Systemcode ATHLET-CD der GRS durchgeführt. Ausgewählte Simulationsergebnisse wurden zudem mit Integralcode MELCOR verglichen.

2. Projektdurchführung

2.1 Einordnung in das Verbundvorhaben, Zeitplan und Meilensteine

Das Projekt war in das gemeinsame Verbundforschungsvorhaben WASA-BOSS (Förderkennzeichen 02NUK028) eingeordnet. Daran waren die folgenden Institutionen beteiligt:

- RWTH Aachen – Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik (RWTH-LRST, Koordinator des Verbundvorhabens),
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, Abteilung für Reaktorsicherheit (HZDR),
- Universität Stuttgart – Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE),
- Institut für Fusionstechnologie und Reaktortechnik (KIT-IFRT),
- Institut für Kern- und Energietechnik (KIT-IKET),
- Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (KIT-INR),
- Ruhr-Universität Bochum – Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft (RUB-LEE),
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH als Unterauftragnehmer von RWTH-LRST.

Die Laufzeit des Verbundvorhabens war von März 2013 bis Februar 2016. Im Oktober 2015 wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 6 Monate beantragt und vom Projektträger im Dezember 2015 genehmigt.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über den zeitlichen Verlauf des Verbundvorhabens und die zu erstellenden Meilensteinberichte. Rot sind dabei die unter Federführung von HZDR erstellten Meilensteinberichte und blau die Meilensteinberichte mit Beteiligung von HZDR gekennzeichnet.

Mit den im Verbundvorhaben beteiligten Institutionen wurde zu Beginn der Projektbearbeitung ein Kooperationsvertrag geschlossen.

Tabelle 2.1: Balkenplan des Verbundvorhabens mit erfolgter Projektverlängerung

AP	Inhalt des AP	Beteiligte Organisationen	2013			2014			2015			2016					
			II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	
			1. Jahr			2. Jahr			3. Jahr			+6 Monate					
0	Koordination	<u>RWTH-LRST</u>															M 99
1	Modell- und Code-Entwicklung																
1.1	Entwicklung und Implementierung eines Modells für die Prozesse im unteren Plenum eines Siedewasserreaktors bei einem schweren Störfall	RWTH-LRST/GRS						M 11									
1.2	Erweiterung und Validierung des COCOSYS Codes für die Analyse des Passiven Containment-Kühlsystems	KIT-IFRT, RWTH-LRST							M 12								
2	Code-Qualifizierung: Code-to-data																
2.1	Verbesserung von Lower Head-Modellen	KIT-IKET						M 22	M 23						M 24		
2.2	Qualifizierung von ASTEC für SWR	<u>KIT-INR</u>						M 21							M 25		
3	Bewertung der aktuellen Modellbasis anhand von Störfallanalysen	RWTH-LRST/GRS															
3.1	Simulation des Unfalls in Fukushima	KIT-IKET, <u>RUB-LEE</u>						M 31		M 33							
3.2	Simulation postulierter Störfälle/Unfälle in deutschen Anlagen	HZDR, IKE						M 32									M 35
3.3	Quantifizierung der Unsicherheiten des Quellterms in DWR/SWR	RWTH-LRST												M 34			
4	Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen	<u>IKE</u>															
4.1	Zusammenstellung geeigneter Störfallmaßnahmen	RWTH-LRST/GRS, IKE, HZDR		M 41													
4.2	Möglichkeiten der Kühlung eines geschädigten Kerns durch Einspeisung in den RDB	HZDR, IKE, KIT-INR						M 42									
4.3	Möglichkeiten der Kühlung und Rückhaltung von Kernschmelze im Sicherheitsbehälter	IKE, RWTH-LRST															
4.4	Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen	IKE, KIT-INR, RWTH-LRST/GRS, HZDR															M 43

Rot: Meilensteinberichte unter Federführung von HZDR

Blau: Meilensteinberichte mit Beiträgen von HZDR

Für das Teilprojekt B galt der Zeitplan entsprechend Tabelle 2.2. In Abstimmung mit dem Projektkoordinator und den beteiligten Projektpartnern wurde das Projekt kostenneutral um 6 Monate bis zum 31.08.2016 verlängert. Entsprechend des Antrags zur Projektverlängerung wurde die Fertigstellung der Meilensteinberichte M35, M-B2 und M43 verschoben.

Tabelle 2.2: Zeitplan der Arbeitspakete und der erreichten Meilensteine

AP	Inhalt des AP	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				+6 Monate		
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	
1	Durchführung von Störfallanalysen						M 32									M 35
2	Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen für DWR		M 41				M 42						M-B2			M-B2, M 43

2.2 Projekttreffen mit HZDR-Beteiligung

- 22.03.2013: Projekt-Kick-off-Treffen in Aachen
- 04./05.11.2013: Projekttreffen in Dresden
- 13.02.2014: Fachgruppentreffen zur ATHLET-CD-Datensatzentwicklung für DWR bei der GRS in Garching
- 31.03./01.04.2014: Projekttreffen in Karlsruhe
- 24.11.2014: Fachgruppentreffen bei der GRS in Garching
- 02./03.03.2015: Projekttreffen in Bochum
- 02.07.2015: Fachgruppentreffen in Dresden mit Beteiligung der für DWR-Analysen zuständigen Projektpartner: IKE, KIT und GRS
- 25.08.2015: Diskussion von offenen Fragen/Problemen bei der Anwendung der neuen ATHLET-CD Version 3.0B (HZDR und GRS) bei der GRS in Garching
- 21./22.01.2016: Projekttreffen in Stuttgart
- 24.05.2016: Fachgruppentreffen zwischen HZDR und KIT-IKET in Dresden zur Diskussion der Vergleiches zwischen ATHLET-CD und MELCOR
- 14./15.07.2016: Abschlusstreffen in Karlsruhe

2.3 Berichte und Veröffentlichungen

Meilensteinberichte:

- M32: Simulation postulierter Störfälle/Unfälle in deutschen Anlagen /Tusheva et al. 2014/,
- M35: Simulation postulierter schwerer Störfälle in deutschen DWR /Jobst et al. 2016c/,
- M-B2: Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen /Wilhelm et al. 2016b/,
- Beitrag zu M41: Störfallmaßnahmen zur Milderung der Folgen von Reaktorunfällen mit schweren Kernschäden /Pohlner et al. 2014/,
- Beitrag zu M42: Zwischenergebnisse zu Störfalluntersuchungen /Trometer et al. 2015/,
- Beitrag zu M43: Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen /Buck et al. 2017/,
- Beitrag zu M99: Executive Summary of the joint research project “Advancement and Application of Severe Accident Codes – Evaluation and Optimization of Accident Management Measures” /Gehr et al. 2017/.

Konferenzbeiträge und Vorträge:

- Beitrag zur Jahrestagung Kerntechnik 2015: „WASA-BOSS: ATHLET-CD Model for Severe Accident Analysis for a Generic KONVOI Reactor“, ausgezeichnet durch Best-Paper-Award /Tusheva et al. 2015a/,
- ATHLET/ATHLET-CD-User-Meeting /Jobst et al. 2016a/,
- Beitrag zur ERMSAR 2017 (eingereicht): „Application of ATHLET-CD code for simulation of SBLOCA 50 cm² severe accident scenario for a generic German PWR“ /Jobst et al. 2017a/.

Publikationen in Zeitschriften:

- atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie: „WASA-BOSS: ATHLET-CD Model for Severe Accident Analysis for a Generic KONVOI Reactor“ /Tusheva et al. 2015b/,
- Kerntechnik: „Severe accident research activities at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)“ /Wilhelm et al. 2016c/,
- Nuclear Engineering and Design: „Statistical Analysis of the Early Phase of SBO Accident for PWR“ /Kozmenkov et al. 2017/.

Technische Notizen und weitere Berichte:

- HLLOCA200 – Comparison between three simulations /Tusheva et al. 2013/,
- LOCA50 – Sensitivity simulations with ATHLET Mod 3.0 Cycle A /Schäfer et al. 2014b/,
- ATHLET-CD model for a generic KONVOI reactor and test simulations for selected SBO and SBLOCA scenarios /Schäfer et al. 2014c/,
- Erfahrungen aus der Anwendung von ATHLET-CD und identifizierte Codeprobleme wurden in Aktivitätsberichten für die GRS zusammengestellt /Kliem et al. 2016; Kliem et al. 2017/,
- Beiträge in Institutsjahresberichten /Wilhelm et al. 2016a; Jobst et al. 2017b/.

2.4 Durchgeführte Arbeiten innerhalb der Arbeitspakete

2.4.1 Arbeitspaket 1 (TPB-AP1): Durchführung von Störfallanalysen

Im ersten Arbeitspaket wurde auf Basis vorhandener ATHLET-Datensätze ein Eingabedatensatz für das Programm ATHLET-CD für einen generischen deutschen DWR erstellt. Entsprechend der Festlegungen auf dem Verbundprojekt-Kick-Off-Meeting erfolgte die Datensatzerstellung in Zusammenarbeit mit der GRS und IKE. HZDR koordinierte dabei die ATHLET-CD-Datensatzerstellung bei der GRS und IKE bezüglich des fachlichen Inhalts sowie der Einhaltung von Terminen. Eine eingefrorene Version des Eingabedatensatzes wurde im Oktober 2014 zusammen mit einer Modellbeschreibung /Schäfer et al. 2014c/ den genannten Organisationen bereitgestellt. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde der Eingabedatensatz erweitert und eine Vielzahl von sich aus den Analysen ergebenden Modifikationen eingearbeitet.

Parallel zur Erstellung des ATHLET-CD-Datensatzes wurde für einen generischen deutschen DWR eine Parameterstudie zu einem Kühlmittelverluststörfall mit kleinem Leck durchgeführt. Dabei kam ein ATHLET-Datensatzes (ohne Kernzerstörungsmodul) zum Einsatz und es wurden sowohl die Position des Lecks als auch die Verfügbarkeit verschiedener Not- und Nachkühlsysteme und deren Einfluss auf den Unfallverlauf untersucht. Zusätzlich wurde der Einfluss von Stickstoff auf die Wärmeabfuhr im Dampferzeuger analysiert.

Mit dem ATHLET-CD-Datensatz wurden Simulationsrechnungen für ausgewählte postulierte Störfallszenarien durchgeführt. Neben der Analyse des simulierten Anlagenverhaltens sollte anhand der durchgeführten Rechnungen der aktuelle Stand der Modellbasis bis hin zur Kernzerstörungsphase analysiert und bewertet werden. Die Auswahl der zu rechnenden Szenarien erfolgte dabei in Abstimmung mit den Projektpartnern, wobei die Szenarien aus den Störfallkategorien Station Blackout (SBO) und Kühlmittelverluststörfälle mit kleinem Leck (engl. Small break loss-of-coolant accident, SBLOCA) als zu untersuchende Szenarien ausgewählt wurden. Anschließend wurde das Anlagenverhalten anhand von Simulationsrechnungen zu ausgewählten Störfallszenarien, die bis zur Kernschädigung führen, genauer analysiert. Durch die

Simulationsrechnungen wurden vorhandene Schwachstellen in der Modellbasis aufgedeckt, woraus weiterer Modellierungsbedarf abgeleitet werden konnte. Parallel zur Analyse der Rechenergebnisse wurde weiterhin eine detaillierte Bewertung der Modellbasis besonders hinsichtlich der Fähigkeit der Systemcodes zur Abbildung des Anlagenverhaltens während schwerer Störfälle durchgeführt.

Des Weiteren wurde ein Code-zu-Code-Vergleich zwischen ATHLET-CD und dem Störfallcode MELCOR erarbeitet. Hierfür wurde ein SBLOCA-Szenario mit 50 cm² Leck ausgewählt, welches unter Annahme der Nichtverfügbarkeit des Sumpfbetriebes in ein schweres Störfallszenario mit Kernzerstörung übergeht.

Die Ergebnisse der in AP1 durchgeführten Arbeiten wurden in den Meilensteinberichten M32 /Tusheva et al. 2014/ und M35 /Jobst et al. 2016c/ zusammengefasst.

Zudem flossen die Ergebnisse in die Arbeiten der Projektpartner (insbesondere IKE) ein und bildeten die Grundlage für die Arbeiten im TPB-AP2.

2.4.2 Arbeitspaket 2 (TPB-AP2): Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen für DWR

HZDR beteiligte sich an der Zusammenstellung geeigneter Störfallmaßnahmen für einen generischen deutschen Druckwasserreaktor (AP 4.1 des Verbundvorhabens) und war an der Erstellung des Meilensteinberichtes M41 /Pohlner et al. 2014/ beteiligt.

Auf Basis des in TPB-AP1 entwickelten Datensatzes für den deutschen DWR und der entsprechenden Störfallanalysen wurden an Hand von ausgewählten Szenarien Notfallmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht. Untersuchungsziel waren dabei vor allem die Zeitgewinne, die sich durch die Maßnahmen erzielen lassen (Zeit bis zum Beginn der Kernaufheizung; bis zum Beginn der Kernzerstörung, bis zur Bildung des Schmelzesees im unteren Plenum, bis zum Behälterversagen). Durch Variationsrechnungen wurden die Maßnahmen optimiert. Hierbei wurden ebenfalls eventuelle gegenläufige Effekte untersucht, welche mit Einleitung einer Notfallmaßnahme den Störfallablauf in bestimmten Aspekten negativ beeinflussen könnten.

Die Ergebnisse der in AP2 durchgeführten Arbeiten wurden in den Meilensteinberichten M42 /Trometer et al. 2015/, M-B2 /Wilhelm et al. 2016b/ und M43 /Buck et al. 2017/ dokumentiert.

Die Ergebnisse waren Teil der Grundlage für die auszuarbeitenden Empfehlungen (AP4.4 des Verbundprojektes).

3. ATHLET-Parameterstudie zu einem kleinen Leck

Innerhalb des Vorhabens wurden zunächst ATHLET-Testrechnungen für Kühlmittelverluststörfälle mit kleinem Leck (SBLOCA) durchgeführt. Der hierfür verwendete Eingabedatensatz basiert auf einem ATHLET-Beispieldatensatz der GRS für Druckwasserreaktoren /GRS 2012/. Hierfür wurden Modellverbesserungen und -erweiterungen in den ATHLET-Datensatz implementiert. Mit dem erweiterten ATHLET-Modell wurde eine Parameterstudie bezüglich Lecklage, Verfügbarkeit von Störfallmaßnahmen und ausgewählter Modelloptionen für ein 50-cm²-Leck durchgeführt. Die Ergebnisse der Parameterstudie wurden in einer Technischen Notiz zusammengefasst und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt /Schäfer et al. 2014b/.

Das ATHLET-Modell bildet einen generischen deutschen Druckwasserreaktor (DWR) mit einer 2-Schleifenmodellierung ab, wobei die Einfachschleife (Loop 2) das Leck und die Verbindung zum Druckhalter enthalten und die Dreifachschleife (Loop 1) die 3 intakten Schleifen der Reaktoranlage modelliert. Im Modell werden alle für die Simulation des SBLOCA-Szenarios relevanten Komponenten abgebildet: das Reaktormodell, die Hauptkühlmittelleitungen, die Dampferzeuger, der Druckhalter und die passiven und aktiven Notkühlsysteme. Der Reaktorkern wird durch zwei parallele thermohydraulische Kanäle mit Brennstäben unterschiedlicher Stableistung modelliert. Alle für die Simulationen benötigten Teile aus dem Reaktorschutz sowie den Regelungen und Begrenzungen, inklusive der Ansteuerung der Sicherheitssysteme werden im GCSM-Teil des Datensatzes abgebildet.

Mit dem Datensatz wurden Simulationen für ein kleines Leck durchgeführt /Schäfer et al. 2014b; Pohlner et al. 2014/. Hierfür wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt (Basisszenario Fall 1a):

- 50-cm²-Leck im kalten Strang zwischen Hauptkühlmittelpumpe und RDB (Loop 2).
- Nach Störfalleintritt wird der Notstromfall unterstellt, d. h. die Hauptkühlmittelpumpen laufen aus und die Notstromversorgung startet zeitverzögert (mit Zuschalten der Dieselgeneratoren).
- Das sekundärseitige Abfahren mit 100 K/h und die Notspeisewasserversorgung der Dampferzeuger sind verfügbar.
- 2 von 4 Notstromdieseln sind unverfügbar, damit fallen 2 Notkühlsysteme (HD- und ND-Pumpen) aus. Von den verfügbaren Systemen speist ein System in die Leckschleife.
- Alle 8 Druckspeicher stehen zur Verfügung, die kaltseitigen Druckspeicher werden 500 s zeitverzögert vom NKV-Signal abgesperrt.
- Nach Entleerung der Flutbecken durch die HD-/ND-Einspeisung wird angenommen, dass die Umschaltung auf Sumpfumwälzbetrieb versagt.

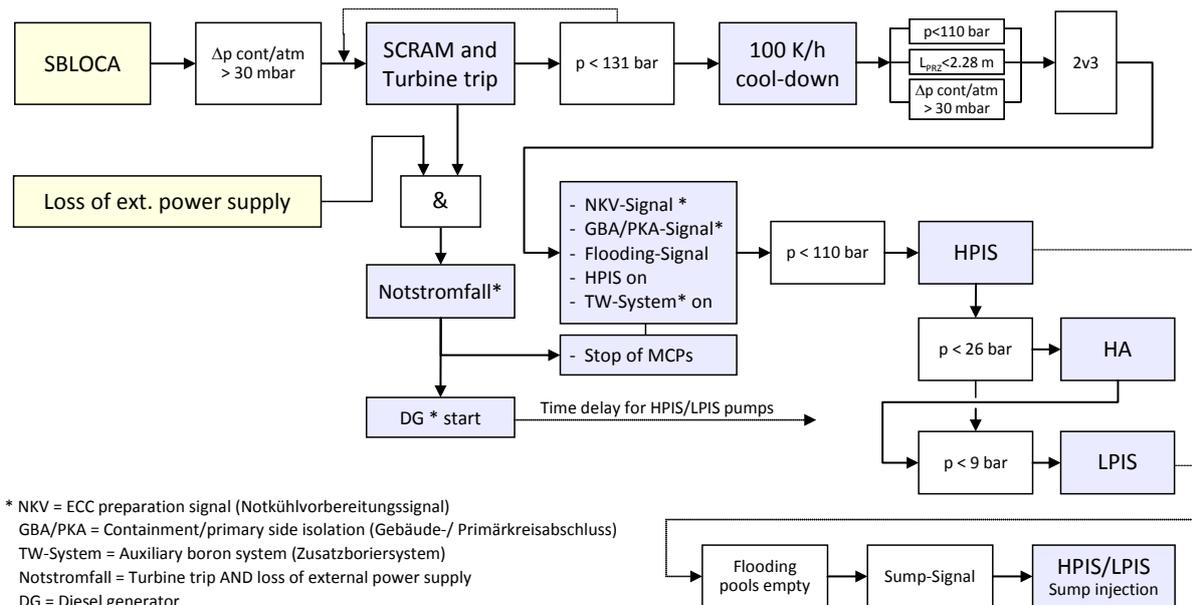


Abb. 3.1: Störfallablauf und Gegenmaßnahmen beim kleinen Leck für einen generischen DWR (Druckangaben = Überdruck)

Abb. 3.1 zeigt für den zugrunde gelegten Leckstörfall den prinzipiellen Ablauf mit den wichtigsten Anregungen aus dem Reaktorschutz sowie automatischen Gegenmaßnahmen. Mit Anstehen des Signals $\Delta p_{\text{cont/atm}} > 30 \text{ mbar}$ oder Primärdruck $< 131 \text{ bar}$ wird RESA und nachfolgend TUSA ausgelöst. Bei Versagen der externen Netzeinspeisung liegt der Notstromfall vor. Somit laufen die Hauptkühlmittelpumpen aus und die Notstromdiesel werden zeitverzögert gestartet. Mit Anstehen des Signals Primärdruck $< 131 \text{ bar}$ wird das sekundärseitige Abfahren ausgelöst und über die Frischdampfabbaseregelung wird die Sekundärseite mit 100 K/h abgekühlt. Die Frischdampfentnahme führt zu einem sinkenden Dampferzeugerfüllstand. Sinkt dieser unter 5 m , so wird die Dampferzeuger-Notbespeisung gestartet, welche den Füllstand wieder anhebt und auf den Sollwert regelt. Mit Anstehen der 2v3 Notkühlkriterien (NKV-Signal) werden die HD-Sicherheitseinspeisepumpen gestartet und die Einspeisung (High pressure injection system, HPIS) beginnt, wenn der Primärdruck unter 110 bar sinkt. Zeitgleich werden Gebäude- und Primärkreisabschluss ausgelöst und das Zusatzboriersystem wird gestartet.

Sinkt der Primärdruck unter 26 bar , so beginnt die Druckspeichereinspeisung (Hydroaccumulator HA) und beim Unterschreiten von 9 bar beginnt die ND-Einspeisung (Low pressure injection system, LPIS). Nach Entleerung der Flutbecken wird unterstellt, dass die Umschaltung auf Sumpfeinspeisung versagt. Mit zunehmender Dampfbildung im Primärkreis und insbesondere in den Dampferzeuger-U-Rohren brechen sowohl die Wärmeübertragung von der Primär- zur Sekundärseite als auch der Naturumlauf auf der Primärseite zusammen. Danach erfolgt die Energieabfuhr nur noch über das Leck. Der Masseverlust über das Leck wird anfangs durch die HD-Einspeisung und die Druckspeichereinspeisung kompensiert, so dass der RDB-Füllstand auf konstantem Niveau oberhalb des Kerns verbleibt. Nach Entleerung der

Flutbecken sinkt der RDB-Füllstand kontinuierlich ab und es kommt zur Kernfreilegung und Kernaufheizung.

Der zeitliche Ereignisablauf bei einem Leckstörfall, die Karenzzeiten für Notfallmaßnahmen durch das Bedienpersonal und die Zeit bis zur Kernaufheizung hängen im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Leckgröße und Lecklage (heiß- oder kaltseitig),
- Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens (100 K/h), der Dampferzeuger-Notbespeisung und der aktiven/passiven Notkühlsysteme,
- Zeitpunkt des Starts von alternativen Bespeisungen als Notfallmaßnahme (z. B. Einspeisung mit einer mobilen Pumpe) und Einspeisepunkt (heiß- oder kaltseitig).

Um den Einfluss der beschriebenen Effekte auf den Störfallablauf beim kleinen Leck zu untersuchen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Basierend auf dem eingangs beschriebenen Basisszenarium wurden die Lecklage (heiß- und kaltseitig), die Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens sowie die Verfügbarkeit und der Einspeisepunkt der aktiven Notkühlsysteme variiert. Um den Einfluss von Stickstoff im Primärkreis auf den Störfallablauf zu untersuchen, wurden zusätzlich Simulationsrechnungen mit und ohne Berücksichtigung von Stickstoff durchgeführt (MULTICOMP-Modell). Tabelle 3.1 zeigt die Matrix der durchgeführten ATHLET-Simulationen. Alle Simulationsrechnungen wurden für einen Zeitraum von 6 Stunden durchgeführt.

Tabelle 3.1: Parameterstudie für ein 50-cm²-Leck –Simulationsmatrix

Fall	Leckposition	Abfahren mit 100K/h	HD-Einspeisung	ND-Einspeisung	Druckspeicher	Stickstoff
1a	P2-CL	Ja	Loop 2+3, HL	Loop 2+3	Ja	Ja
1b	P2-CL	Nein	Loop 2+3, HL	Loop 2+3	Ja	Ja
1c	P2-CL	Nein	Loop 2+3, CL	Loop 2+3	Ja	Ja
1d	P2-CL	Nein	Nein	Loop 2+3	Ja	Ja
1e	P2-CL	Nein	Nein	Loop 2+3	Ja	Nein
1f	P2-CL	Ja	Loop 2+3, HL	Loop 2+3	Ja	Nein
2a	P2-HL	Ja	Loop 2+3, HL	Loop 2+3	Ja	Ja
2b	P2-HL	Nein	Loop 2+3, HL	Loop 2+3	Ja	Ja
2c	P2-HL	Nein	Loop 2+3, CL	Loop 2+3	Ja	Ja
2d	P2-HL	Nein	Nein	Loop 2+3	Ja	Ja
2e	P2-HL	Nein	Nein	Loop 2+3	Ja	Nein
2f	P2-HL	Ja	Loop 2+3, HL	Loop 2+3	Ja	Nein

Eine detaillierte Beschreibung der Simulationsrechnungen und der Ergebnisse ist in /Schäfer et al. 2014b/ gegeben. Nachfolgend werden die wichtigsten Schlussfolgerungen aus der Parameterstudie zusammengefasst:

- Für eine möglichst genaue Berechnung der Karenzzeiten für die Einleitung von Notfallmaßnahmen und für das Einsetzen der Kernaufheizung sollten die Thermofluid- und Anlagendynamik möglichst detailliert abgebildet werden (Mehrschleifenmodell für die Berücksichtigung asymmetrischen Verhaltens und Berücksichtigung des Einflusses von Stickstoff auf die Wärmeübertragung in den Dampferzeugern).
- Um die Wirksamkeit der Späteinspeisung von Wasser mit einer mobilen Pumpe zu untersuchen, sollten Szenarien mit unterschiedlichem Niveau der Nachzerfallsleistung (z.B. BOC, EOC) gewählt werden.
- Wegen des asymmetrischen Verhaltens zwischen Leckschleife und intakten Schleifen (Wärmeübergang von der Primärseite zur Sekundärseite, Naturumlauf) sollten die heiß- und kaltseitige Einspeisung mit einer mobilen Pumpe untersucht werden.
- Der Einfluss der Leckposition (heiß- oder kaltseitig) auf die thermohydraulischen Phänomene während des Störfallablaufs ist weniger ausgeprägt. Hier hat die Kombination aus Lecklage und Einspeisepunkt der aktiven Notkühlsysteme einen deutlich größeren Einfluss (Abb. 3.2 und Abb. 3.3).
- Bei kleinen Lecks ohne 100-K/h-Abfahren und mit HD-Notkühleinspeisung kann der Primärdruck für längere Zeit auf einem Niveau oberhalb des Ansprechdrucks der ND-Notkühlsysteme verbleiben (Abb. 3.4). Für solche Szenarien sollte die Anwendbarkeit der primärseitigen Druckentlastung als Notfallmaßnahme untersucht werden.
- In Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen für die Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens und der aktiven Notkühlsysteme kann der Störfallablauf bezüglich des Zeitpunkts der Kernaufheizung in drei Kategorien eingeteilt werden (Abb. 3.3):
 - Die Kernaufheizung tritt frühzeitig bei hohem Niveau der Nachzerfallsleistung auf,
 - Die Kernaufheizung beginnt deutlich verzögert, wobei der Primärdruck noch relativ hoch ist (Abb. 3.4) und die ND-Notkühlsysteme noch nicht oder mit nur ungenügendem Massenstrom einspeisen können,
 - Abhängig von der Verfügbarkeit der Notkühlsysteme beginnt die Kernaufheizung sehr spät im Störfallablauf auf niedrigem Niveau der Nachzerfallsleistung oder sie tritt bis zum Ende des Berechnungszeitraums nicht auf.
- Für SBLOCA-Simulationen sollte berücksichtigt werden, dass die Fälle mit Stickstoff im Primärkreis und mit sekundärseitigem Abfahren deutlich mehr Rechenzeit benötigen.

Die Ergebnisse der Parameterstudie wurden für die Auswahl geeigneter Szenarien für die Simulationen mit dem ATHLET-CD-Datensatz für einen generischen KONVOI-Reaktor herangezogen.

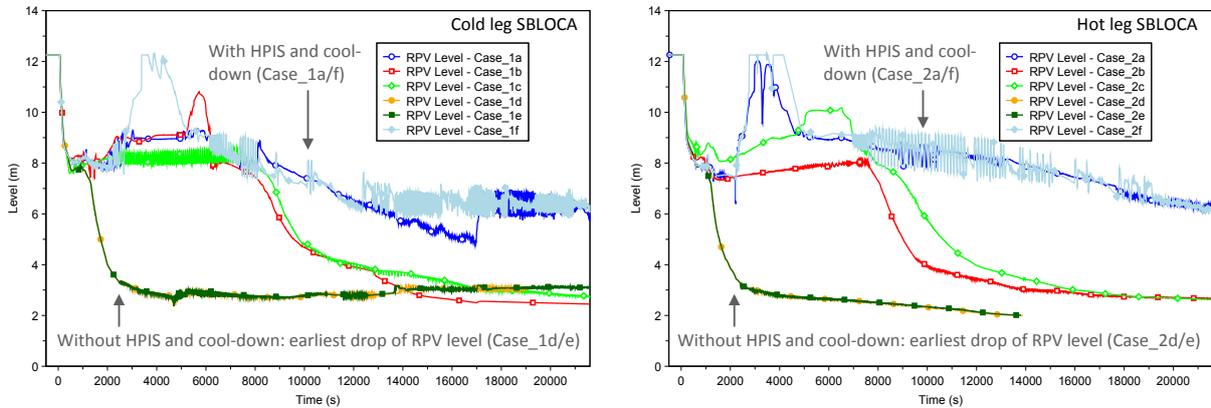


Abb. 3.2: RDB-Füllstand für die Simulationen zum kalt- und heißseitigen kleinen Leck

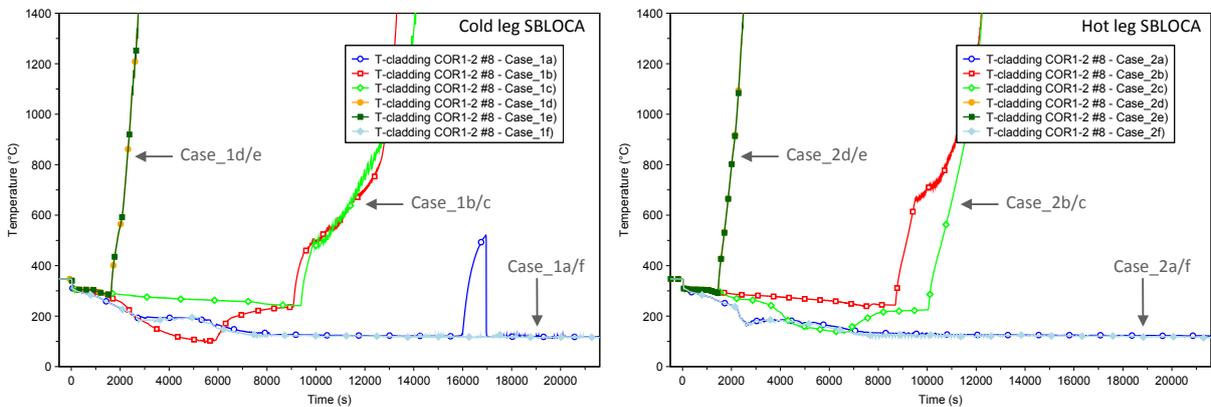


Abb. 3.3: Brennstabhüllrohrtemperaturen für die Simulationen zum kalt- und heißseitigen kleinen Leck

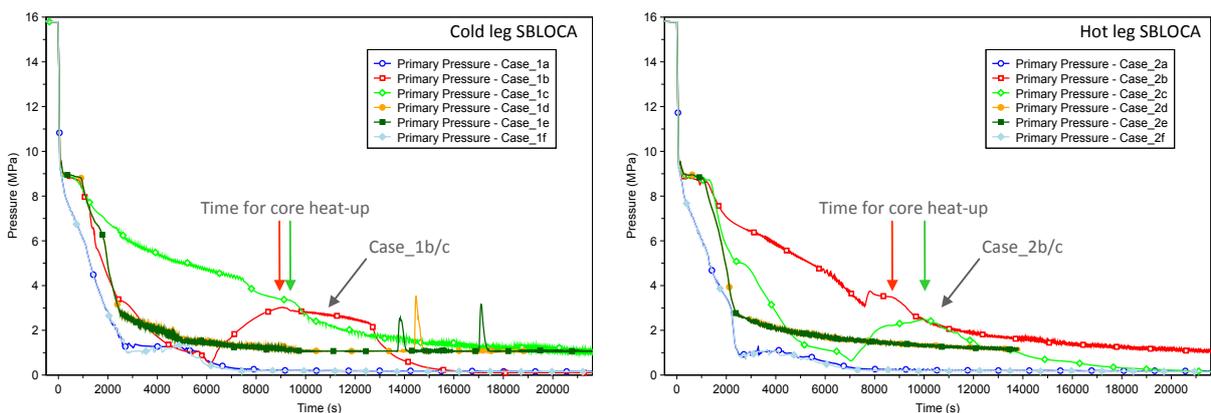


Abb. 3.4: Primärdruck für die Simulationen zum kalt- und heißseitigen kleinen Leck

4. ATHLET-CD-Modell eines generischen KONVOI

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das im Rahmen des Vorhabens entwickelte ATHLET-CD-Modell für die Simulation von schweren Störfallszenarien eines generischen deutschen DWR (Typ KONVOI). Der Eingabedatensatz des generischen KONVOI basiert auf dem von der GRS zusammen mit ATHLET bereitgestellten DWR-Beispieldatensatz /GRS 2012; Lerchl et al. 2012/ und wurde durch GRS, IKE und HZDR im Rahmen des Arbeitspakets WP3 (Verbundvorhaben) erarbeitet.

Eine eingefrorene Version des Eingabedatensatzes wurde im Oktober 2014 zusammen mit einer Modellbeschreibung /Schäfer et al. 2014c/ den genannten Organisationen bereitgestellt. Seitdem wurde das Modell durch HZDR kontinuierlich weiter verbessert und entsprechend der zu simulierenden Störfallszenarien angepasst. Es wurde dabei an die in der öffentlich zugänglichen Literatur genannten KONVOI-Anlagenparameter angepasst /GKN 2011; Ziegler, Allelein 2013; Ilg et al. 2008; Kleinedler 2002; AREVA 2007; Neeb 1997; Kennard, Harbottle 2000/.

Signifikante Modellanpassungen wurden in den Meilensteinberichten M32, M35 /Tusheva et al. 2014; Jobst et al. 2016c/ sowie in den Projektjahresberichten /Schäfer et al. 2014a; Jobst et al. 2016b/ detailliert dargestellt und werden hier auszugswise wiedergegeben.

Abschnitt 4.1 fasst die wesentlichen Eigenschaften des thermohydraulischen Teilmodells sowie die mit dem GCSM-Modul modellierte Anlagenlogik zusammen. In Abschnitt 4.2 sind die Teilmodelle zur Beschreibung der Kernzerstörungsprozesse beschrieben.

4.1 Anlagenmodell und Thermohydraulik

Das ATHLET-CD-Modell bildet den Primär- sowie Teile des Sekundärkreises eines generischen DWR ab. Ein Nodalisierungsschema für Primär- und Sekundärkreis der Reaktoranlage ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Das thermohydraulische Modell des Primärkreises beinhaltet den Reaktordruckbehälter, die Hauptkühlmittelleitungen mit den Hauptkühlmittelpumpen, den Druckhalter, die Primärseite der Dampferzeuger (U-Rohrbündel) und die für die zu untersuchenden Szenarien relevanten Sicherheitssysteme (aktive und passive Sicherheitseinspeisesysteme, wie z. B. die HD-, ND-Notkühlpumpen und Druckspeicher).

Äquivalent zum in Kapitel 3 beschriebenen ATHLET-Modell wird der Primärkreis auch im ATHLET-CD-Modell durch 2 Schleifen modelliert: eine Dreifachschleife und eine Einfachschleife. Die Dreifachschleife repräsentiert drei Kühlmittelschleifen der realen Anlage, während die Einfachschleife über die Druckhalterausgleichsleitung mit dem Druckhalter verbunden ist. Bei Kühlmittelverluststörfällen befindet sich das Leck in der Einfachschleife, während die Dreifachschleife intakt bleibt.

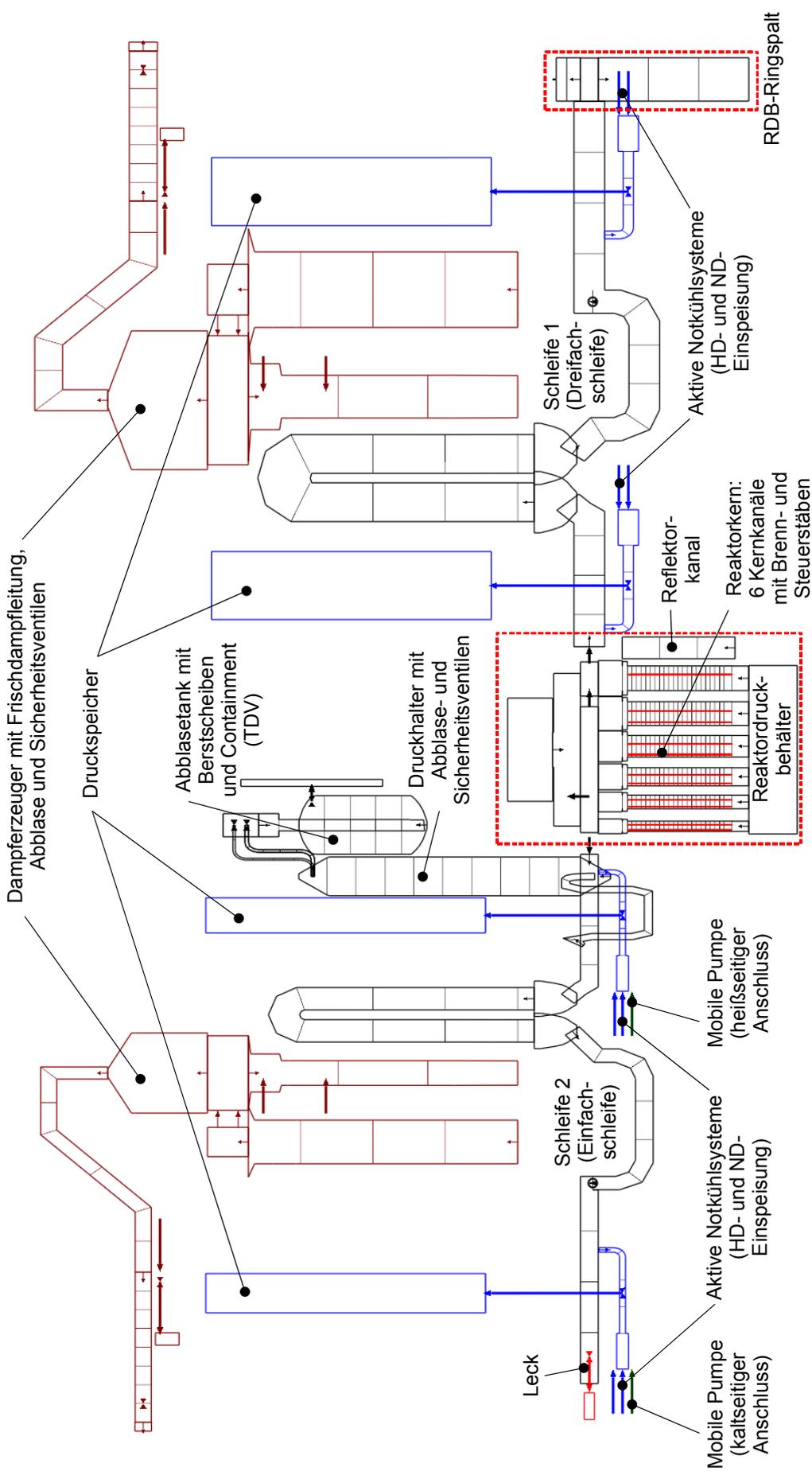


Abb. 4.1: Nodalisierungsschema für den generischen DWR vom Typ KONVOI

Für den Druckhalter wurden die Abblaseregel- und Sicherheitsventile inklusive der Ansteuerung über GCSM-Signale modelliert. Die Ventile sind mit einem Modell des Abblasetanks verbunden. Über ein Ventil, welches die Berstscheibe modelliert, wird nach Erreichen des Berstdruckes von 14 bar die Verbindung zum Containment hergestellt /Kleinedler 2002/. Bei den mit diesem Modell durchgeführten Simulationen wurden Strömungssoszillationen innerhalb des Abblasetanks festgestellt, die teilweise zu sehr kleinen Rechenschritten führten ($< 10^{-4}$ s). Deshalb wurde ebenfalls eine Modelloption ohne Abblasetank erarbeitet, die für die überwiegende Zahl der in diesem Bericht dargestellten Analysen zum Einsatz kam. Es konnte zudem gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse für die relevanten Szenarien SBO und SBLOCA mit und ohne Abblasetank nahezu identisch sind, für das Modell ohne Abblasetank jedoch signifikant kürzere Rechenzeiten notwendig sind /Jobst et al. 2016c, Anhang B.4/.

Das Containment selbst ist vereinfacht als Time-Dependent-Volume (TDV, Druck-Enthalpie-Randbedingung) modelliert. Im ATHLET-CD-Datensatz sind Lecks mit 50 cm² und 200 cm² Leckfläche modelliert. Für die Berechnung der Leckrate wird das eindimensionale Modell für kritisches Ausströmen (CDR1D) verwendet. Der Gegendruck nach Lecköffnung wird vereinfacht als konstant (1 bar) angenommen, d. h. der Druckaufbau im Containment wird nicht berücksichtigt.

Auf der Sekundärseite sind die Dampferzeuger sowie die Frischdampfleitungen bis zur Position der Abblaseregel- und Sicherheitsventile modelliert. Dabei kommt ebenfalls die Einteilung in einen Einfach- und einen Dreifachdampferzeuger zum Tragen. Die Thermofluidodynamiksysteme von Primär- und Sekundärseite sind durch Wärmeleitobjekte verbunden, welche den Wärmeübergang in den Dampferzeuger-U-Rohren modellieren. Die Sekundärseite der Dampferzeuger ist in den Fallraum, den Steigraum, den Separator und den Dampfdom unterteilt. Im Fallraum strömt Speisewasser nach unten, wird im unteren Teil des Dampferzeugers umgelenkt und strömt danach im Steigraum wieder nach oben. Der entstehende Dampf strömt über den Separator zum Dom und danach zur Frischdampfleitung in Richtung Turbine. Im Separator werden Dampf und Wasser getrennt, der Wasseranteil strömt zurück in den Fallraum und vermischt sich mit dem Speisewasser. Die Turbine ist im Datensatz vereinfacht durch ein TDV in Kombination mit einem Ventil (VALVE-Objekt) modelliert. Das TDV definiert eine Druck-Enthalpie-Randbedingung, die einen thermodynamischen Zustand nahe dem Turbineneintritt repräsentiert. Speisewasser- und die Notspeisewasserversorgung werden durch FILL-Objekte (Massenstrom-Enthalpie-Randbedingungen) modelliert.

Abb. 4.2 zeigt das Nodalisierungsschema für den Reaktordruckbehälter (RDB). Vom Eintritt in den RDB strömt das aus dem kalten Strang kommende Kühlmittel in den Ringspalt, wird im unteren Plenum umgelenkt, gelangt danach in den Kern und strömt über das obere Plenum in den heißen Strang der Hauptkühlmittelleitungen.

Der Reaktorkern wird durch 6 parallele Kernkanäle und den Kernbypass modelliert. Die aktive Zone ist dabei axial in 20 Teilvolumina unterteilt. Der Kern enthält 193 BE mit 57900 Brennstäben mit einer aktiven Länge von 3,9 m sowie 61 Steuerelemente mit 1464 Steuerstäben /Ziegler et al. 2013/. Das verwendete axiale Leistungsprofil hat ein lokales Maximum im oberen Bereich des Kerns (generisches Leistungsprofil im Kernzustand EOC). Die Kernkanäle sind untereinander durch Querverbindungen (cross connection objects, CCO) verbunden, wodurch der Queraustausch berücksichtigt wird. Das obere Plenum ist in 2 Teilvolumina unterteilt, fünf Kernkanäle münden in das erste Teilvolumen, der sechste Kernkanal ist mit dem zweiten Teilvolumen verbunden. Durch diese Unterteilung können die Kernkühlung bei einer Teilblockade des Kerns und die Einspeisung von Notkühlwasser über das obere Plenum in den Kern besser modelliert werden.

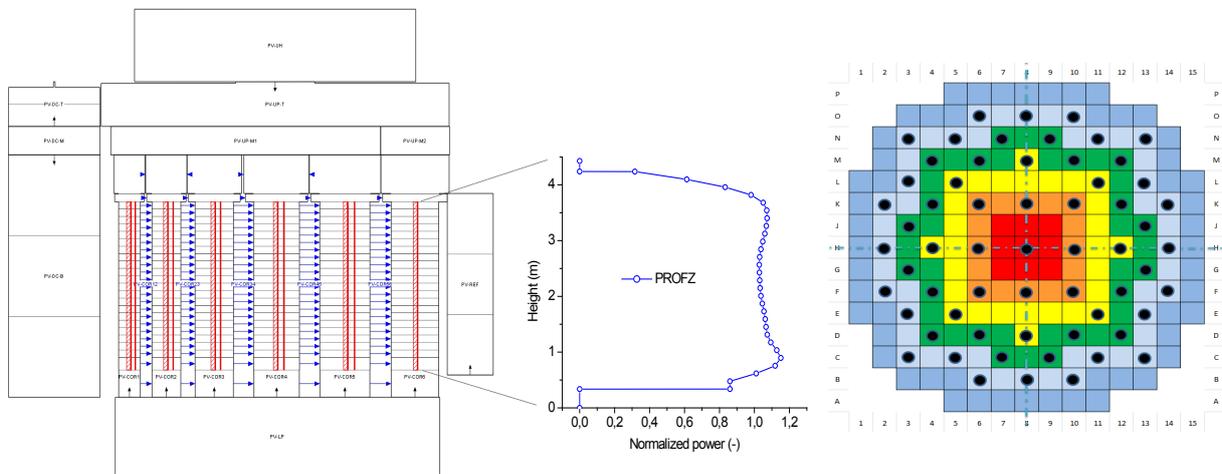


Abb. 4.2: Nodalisierungsschema für den Reaktordruckbehälter mit dem in parallele Kanäle unterteilten Reaktorkern und axiale Leistungsverteilung (links), Aufteilung des Kerns in die 6 Ringe (rechts)

4.2 Modellierung der Kerndegradationsprozesse

4.2.1 Core-Degradation-Modul (CW ECOREMOD)

Das Modul ECORE umfasst Modelle für die Brennstäbe, Steuerstäbe und Brennelementkästen (relevant für Siedewasserreaktoren). Das Modul beschreibt die Aufheizphase im Reaktorkern, das mechanische Brennstabverhalten (Aufblähen und Bersten der Hüllrohre), die Oxidation der Brennstabhüllrohre in Dampf oder Dampf-Luft-Gemischen, die Auflösung von Brennstoff durch Zirkonium, den Schmelzvorgang von metallischen und keramischen Komponenten sowie die Verlagerung von Kernmaterial innerhalb des Reaktorkerns. Das Modul besitzt mehrere Rückwirkungen auf das TFD-Modul, wie Aufheizen des Kühlmittels durch die freigesetzte Reaktorwärmeleistung. Ebenfalls werden der Dampf- oder Sauerstoffverbrauch und die Menge des erzeugten Wasserstoffs im TFD-Modul berücksichtigt.

Für die Verlagerung des geschmolzenen Materials von oberen Kernbereichen in daruntergelegene Bereiche kommt ein Schmelzesträhnenmodell zum Einsatz /Kronenberg 2001; Trambauer et al. 2004/. Dabei wird vom Abfließen des Materials in Form von einzelnen Schmelzesträhnen auf der Oberfläche noch intakter Hüllrohre ausgegangen. Erreichen die Schmelzesträhnen Kernbereiche mit geringerer Temperatur, erfolgt dort eine Erstarrung und Akkumulation des Materials. Die Oxidation, das Wiederaufschmelzen und Wiedererstarren von Material wird berücksichtigt. Ebenfalls wird die Bildung sowie das Wiederauflösen von Blockaden in einzelnen Kernbereichen modelliert. Diese Blockaden behindern die Kühlmittelströmung, was eine verminderte Kühlung der betreffenden Kernbereiche zur Folge hat (Rückwirkung auf das TFD-Modul).

Die Implementierung der für die einzelnen Teilmodelle benötigten Daten, Modellparameter und Optionen erfolgt blockorientiert mit Kontroll- und Keywörtern. Wichtige Daten, z. T. auch kernspezifisch, werden im ECORE-Modul definiert. Dazu gehören u. a.:

- Axiale Leistungsprofile und Daten für die Nachzerfallsleistung,
- Reaktorleistung und deren Aufteilung auf die einzelnen ringförmigen Kernbereiche (radiales Leistungsprofil),
- Daten für die Oxidationsmodelle und das mechanische Brennstabverhalten,
- Daten und Modelloptionen für die Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Kernmaterialien,
- Wechselwirkung zwischen thermischem Verhalten und der Kernschädigung, wie die Ausbildung von Blockaden, radiale Wärmeleitung durch Strahlung, Berechnung des Übergangssiedens und der verschiedenen Wärmeübergangskorrelationen.

Die wichtigsten im Eingabedatensatz des generischen KONVOI verwendeten Komponenten des Moduls ECORE werden nachfolgend dargestellt.

4.2.1.1 Modellierung Kernaufbau und Leistungsverteilung

Der Kern des KONVOI-Reaktors besteht aus 193 Brennelementen (BE) mit 18x18-24 Brennstäben pro BE (insgesamt 57900 Brennstäbe) und 61 Steuerelementen (1464 Steuerstäbe). Der Kern wurde radial in 6 konzentrische Ringe eingeteilt und jeder Ring wird durch eine Kernsektion (benannt mit ROD1 bis ROD6) im Modell abgebildet. In jeder Kernsektion werden ein repräsentativer Brennstab und ein repräsentativer Steuerstab modelliert (außer Kernsektion 6, die keine Steuerstäbe enthält). Für jede Sektion sind der radiale Leistungsfaktor und die Zahl der Brenn- und Steuerstäbe im Eingabedatensatz definiert. Dabei wurden die wesentlichen Anlagenparameter aus /GKN 2011; Ziegler et al. 2013/ extrahiert. Eine vollständige Liste der verwendeten ECORE-Parameter ist in /Jobst et al. 2016c, Anhang A/ gegeben.

Jede ROD-Sektion ist axial in 22 Kontrollvolumen (CV) eingeteilt, mit 20 CV in der aktiven Kernzone und jeweils 1 CV für den Bereich des unteren und oberen Brennstabstopfens. Jede ROD-Sektion ist weiterhin mit einem Thermofluidobjekt (TFO) verknüpft, welches den Strömungskanal der Sektion abbildet, derart, dass jedes CV des repräsentativen Brennstabs mit genau 1 CV im TFO verbunden ist (Parameter NDIVCO = 1).

Zwei Varianten für die Modellierung der durch Kernspaltung und Nachzerfall freiwerdenden Wärme sind im Datensatz implementiert:

- Modellierung der Nachzerfallswärme (NZW) durch die Module OREST und FIPISO in Kombination mit einer durch Tabellenwerte definierten Kernspaltungsleistung. Dabei bleibt die Kernleistung bis zur RESA konstant gleich dem gegebenen Nominalwert (ECORE-Parameter NEKT = - 1).
- Definition der NZW durch Tabellenwerte und Berechnung der Kernspaltungsleistung durch ein Punktkinetikmodell während der Anfangsphase der Transiente (wobei eine Reaktivitätsrückkopplung durch Änderung des thermohydraulischen Zustandes sowie die Zufuhr externer Reaktivität mit betrachtet werden, Parameter NEKT = 1). Die Module OREST und FIPISO werden bei dieser Variante nicht verwendet.

Die bevorzugte Variante ist die erstgenannte, da diese eine detaillierte Berechnung der NZW auf Basis der Kernkonfiguration, Abbrand und Leistungsgeschichte ermöglicht. Jedoch unterstützt die verwendete ATHLET-CD-Version 3.0 A keine Kombination der Neutronenkinetik mit der Berechnung der NZW durch OREST/FIPISO, was für Transienten mit verzögerter RESA von Bedeutung ist. So kann zum Beispiel im Falle von Kühlmittelverluststörfällen mit kleinen Lecks die Dauer zwischen Auftreten des Lecks und der RESA einige 10 Sekunden betragen, wobei aufgrund der Druckreduzierung eine signifikante Rückkopplung auf die Neutronenkinetik besteht. Im aktuellen Modell bleibt die Leistung dagegen konstant.

Zusätzlich wurde in der Programmversion 3.0A ein Fehler identifiziert, der zu einer fehlerhaften Berechnung der Leistung führt, wenn die Module OREST/FIPISO zusammen mit dem Modul AIDA verwendet werden. Deswegen musste im Projektvorhaben die zweite Variante für die Modellierung der NZW verwendet werden. Die NZW-Tabellenwerte wurden dabei in einer vorausgehenden ATHLET-CD-Rechnung mit OREST/FIPISO (aber ohne Kernzerstörung) ermittelt, mittels eines Python-Skriptes automatisiert extrahiert und in den Eingabedatensatz implementiert (siehe /Jobst et al. 2016c, Anhang B.7/).

4.2.1.2 Geometrie der Brenn- und Steuerstäbe sowie Materialdaten

Die verwendeten Parameter zur Beschreibung der Brenn- und Steuerstabgeometrie sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Die Länge der Brennstabstopfen werden

durch die beiden Parameter STU und STO definiert. Zusätzlich wurde das optionale Rod-Plug-Modell für die Brennstäbe und Steuerstäbe verwendet (PW RODPLUG und PW CRPLUG). Die hierfür verwendeten Parameter (XMSTOU = XMSTOO = 0,4 kg/m) wurden anhand von durch die GRS bereitgestellten Daten spezifiziert /Hollands 2015/.

Tabelle 4.1: Implementierte Brenn- und Steuerstabgeometrie

Bezeichnung	ATHLET-CD-Parameter	Einheit	Wert	Referenz
Länge des unteren Stopfens	STU	m	0,338	/GRS 2012/
Länge des oberen Stopfens	STO	m	0,190	/GRS 2012/
Kopplung zu den TFO (Strömungskanäle des Kerns), definiert aktive Länge	SBCORE	m	1,05	/GRS 2012/
	SECORE	m	4,95	/GRS 2012/
	Aktive Länge	m	3,90	/AREVA 2007/
Pelletradius	RPEL	mm	4,025	/Neeb 1997/
Hüllrohrinnenradius	RCLI0	mm	4,11	/AREVA 2007/
Brennstabaußenradius	RROD0	mm	4,75	/AREVA 2007/
Außenradius Steuerstab	CRBA	mm	4,65	/Kennard et al. 2000/
Radius des Absorbermaterials	CRAIC	mm	4,00	IB, basierend auf /Kennard et al. 2000/

IB = Ingenieurtechnische Bewertung

4.2.1.3 Verwendete Materialdaten

Die Materialdaten für Brennstoff, Brennstabhüllrohr (Zircalloy), oxidiertes Hüllrohr, Brennstabstopfen, Neutronenabsorber und Absorberstabhüllrohr wurden mittels tabellarischen Werten definiert (siehe PW HEATINPTAB). Die Wärmeleitfähigkeiten und spezifischen Wärmekapazitäten wurden als Funktionen der Temperatur definiert, während konstante Werte für die Dichten angenommen wurden.

Der KONVOI-Reaktorkern ist mit einer anfänglichen Masse von 103 t Schwermetall Uran beladen /GKN 2011/. Bei einer Anreicherung von 4 % kann daraus die Gesamtmasse an UO_2 ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
 m_{UO_2} &= m_U \frac{M_{UO_2}}{M_U} \\
 &= 103 \text{ t} \cdot \frac{0,04 \cdot 235 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0,96 \cdot 238 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 2 \cdot 15,999 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0,04 \cdot 235 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0,96 \cdot 235 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \\
 &= 103 \text{ t} \cdot \frac{269,878 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{237,88 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \approx 116,855 \text{ t.}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Aus der gegebenen Brennstabgeometrie kann das Brennstoffvolumen bestimmt werden:

$$\begin{aligned} V_{UO_2} &= n_{\text{rod}} \pi r_{\text{pel}}^2 L_{\text{active}} \\ &= 57900 \cdot \pi \cdot (4,025 \text{ mm})^2 \cdot 3,9 \text{ m} \\ &\approx 11,493 \text{ m}^3. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Demzufolge wurde die im KONVOI-ID verwendete UO_2 -Dichte auf 10167 kg/m^3 angepasst.

4.2.1.4 Modellierung der Wärmeübertragungsprozesse

Im Modell werden radiale und axiale Wärmestrahlung zwischen sowie axiale Wärmeleitung in den Brenn- und Steuerstäben berechnet (Option IWLST=4). Es wird eine Emissivität der Brennstaboberflächen von 0,8 angenommen /Austregesilo et al. 2014/.

Grundsätzlich ist in ATHLET-CD eine Strahlungskopplung zwischen Kern und Umgebung implementiert, die besonders bei hohen Kerntemperaturen von Bedeutung ist. In radialer Richtung ist der Kern durch Strahlungsaustausch mit der Kernumfassung (Wärmeleitobjekte HPV-REF1, HPV-REF2 und HPV-REF3) gekoppelt, siehe PW HECUNAMER. Die axiale Strahlungskopplung zwischen Kern und unterer Kerngitterplatte sowie zwischen Kern und den darüber liegenden Strukturen kann mit dem PW HECUNAMEBT gesetzt werden. Dies wurde getestet, führte jedoch in ATHLET-CD zu Energiebilanzproblemen und einer bei geringer Schmelzmasse für lange Zeiten verharrenden Kernschmelze (siehe /Jobst et al. 2016c, Anhang B.6/). Deshalb werden diese Flächen im vorliegenden Eingabedatensatz als adiabat angenommen. Ein Nachteil dieser Annahme ist, dass die Aufheizung der unteren Kerngitterplatte damit nicht berechnet werden kann. Deshalb besteht hier in ATHLET-CD weiterer Verbesserungsbedarf /Kliem et al. 2016/.

4.2.1.5 Modellierung des mechanischen Brennstabverhaltens

Der Druck im Brennstabgasspalt wird von ATHLET-CD in Abhängigkeit der Temperaturverteilung und Gaszusammensetzung berechnet. Dafür sind Anfangswerte im Eingabedatensatz vorzugeben ($p_{\text{Spalt}} = 3,2 \text{ MPa}$, $T_{\text{Spalt}} = 593 \text{ K}$, freies Volumen im oberen Bereich des Brennstabs 10^{-5} m^3 , Porosität des UO_2 0,017). Diese Parameter wurden von den ATHLET-CD-Programmentwicklern im Rahmen der Entwicklung des Eingabedatensatzes zur Verfügung gestellt /Schäfer et al. 2014c/. In der öffentlich zugänglichen Literatur konnten keine weiteren Detailinformationen zum Druck im inneren des Gasspalt gefunden werden, weshalb die gegebenen generischen Werte beibehalten wurden.

Für die Bestimmung des Hüllrohrversagens wird das Kriterium einer maximal zulässigen Hüllrohrdehnung von 38 % angenommen (Eingabeparameter IBLOW=0).

4.2.1.6 Kernblockademodell

Die Strömungsverteilung innerhalb des Kerns hängt von der Brennstabgeometrie ab, die sich während einer Störfall-/Unfalltransiente durch Brennstabblähen sowie Materialverlagerung ändern und zu Blockaden im Kern führen kann. ATHLET-CD verwendet den Porositätsfaktor als charakteristischen Parameter, um diese Strömungsblockaden zu beschreiben. Die Porosität ε ist durch das Volumen von Fluid und Strukturen definiert /Trambauer et al. 2004/:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{fluid}}}{V_{\text{fluid}} + V_{\text{structure}}}. \quad (4.3)$$

Für die im Eingabedatensatz gegebenen Brennelemente beträgt die Porosität zu Beginn der Transiente:

$$\varepsilon_0 \approx 0,590. \quad (4.4)$$

Änderungen der Porosität wirken sich auf den Strömungsquerschnitt in der Form

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (4.5)$$

aus und ändern zudem die Druckverlustkoeffizienten in der folgenden Form

$$\frac{\text{ZFF}}{\text{ZFF}_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2. \quad (4.6)$$

Nach /Trambauer et al. 2004/ zeigten Vergleiche zwischen Messdaten und ATHLET-CD-Ergebnissen, dass eine Anpassung des Blockademodells notwendig ist, um die in Experimenten gefundene verstärkte Blockade und Umverteilung der Strömung für Porositätswerte unterhalb von 0,3 abzubilden. Das modifizierte Modell ist in /Trambauer et al. 2004/ beschrieben:

$$\frac{A}{A_0} = \min\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \text{BF}\right) \quad (4.7)$$

und

$$\frac{\text{ZFF}}{\text{ZFF}_0} = \min\left(\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2, \left(\frac{1}{\text{BF}}\right)^2\right). \quad (4.8)$$

Dabei ist BF ein über mehrere Eingabeparameter für radiale und axiale Strömung definierter Blockadefaktor. Nach /Austregesilo 2015/ wird die Verwendung der ATHLET-CD-Standardwerte empfohlen. Deshalb wurden die folgenden Werte in den Eingabedatensatz des generischen KONVOI übernommen:

- untere Grenze für offene Poren POPEN = 0,3 (Modellierung entsprechend Formel 4.5 und 4.6),

- untere Grenze für die Reduktion radialer Strömung PCLSR = 0,27 und
- untere Grenze für die Reduktion axialer Strömung PCLSX = 0,25.

Die Auswirkungen auf die Reduktion des Strömungsquerschnittes sind in Abb. 4.3 dargestellt.

Bei der Simulation von Störfalltransienten mit der Programmversion ATHLET-CD 3.0B traten im Kern Strömungsoszillationen auf, die zu sehr kleinen Zeitschritten führten ($< 10^{-5}$ s). Nach dem gegenwärtigen Stand der Analyse dieser Simulationen ist die Ursache vermutlich mit der Blockade von Strömungskanälen infolge Hüllrohrblähen verknüpft. Weitergehende Analysen sind hierfür notwendig. Da bei der Verwendung von ATHLET-CD 3.0A diese Oszillationen nicht auftraten, wird diese Programmversion für die Durchführung der überwiegenden Zahl der in diesem Bericht dargestellten Simulationen verwendet. Eine detaillierte Darstellung des Problems ist /Jobst et al. 2016c, Anhang B.2/ zu entnehmen.

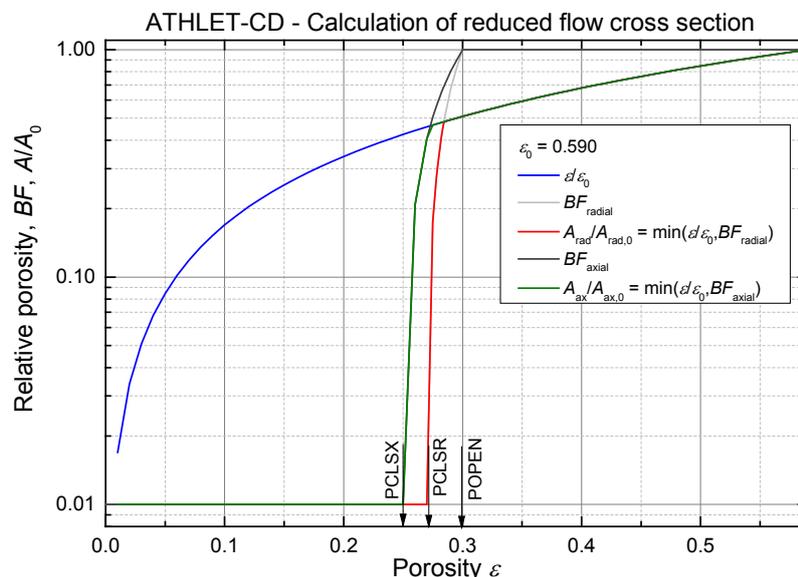


Abb. 4.3: Relative Strömungsquerschnittsfläche für radiale und axiale Strömung, berechnet durch das Blockademodell für den generischen KONVOI. Für Porositäten größer 0,285 wird die Strömungsquerschnittsfläche durch die relative Porosität beschrieben. Unterhalb von 0,285 wird die relative Strömungsquerschnittsfläche durch eine lineare Interpolationsfunktion signifikant bis auf 0,01 reduziert. Für Porositäten kleiner 0,275 erfolgt die Reduktion der Strömungsquerschnittsfläche für die axiale Strömung in ähnlicher Weise.

4.2.1.7 Modellierung der Oxidationsprozesse im Kern

Die Oxidation der Brenn- und Steuerstäbe durch Wasserdampf trägt während der Kerndegradationsphase maßgeblich zur im DWR-Reaktorkern freigesetzten Leistung bei und kann dabei Werte größer 100 MW erreichen /Brockmeier 1996/.

Es wurden in der Literatur mehrere Korrelationen zur Beschreibung der Zirkonoxidation beschrieben, die gewöhnlich auf einem Arrhenius-Raten-Ansatz basieren:

$$R = A e^{\frac{-B}{R_{\text{gas}} T}} g(p_{\text{H}_2\text{O}}), \quad (4.9)$$

wobei R die Reaktionsrate, R_{gas} die universelle Gaskonstante ($R_{\text{gas}} = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$), B die Aktivierungsenergie (J/mol), T die Temperatur (K) und A eine Ratenkonstante (Dimension abhängig vom verwendeten Modell) bezeichnen /Trambauer et al. 2009/. A und B wurden aus Experimenten gewonnen.

In den ATHLET-CD-Programmversionen 3.0A und 3.0B sind drei verschiedene Korrelationen implementiert, die für viele Validierungsexperimente eine gute Übereinstimmung mit Messdaten erzielen („Best-estimate“-Korrelationen /Hollands 2015; Weber et al. 2016/). Die Kombination der Cathcart-Korrelation (für den niedrigen Temperaturbereich von 1273 bis 1800 K) mit der Urbanic-Heidrick-Korrelation (für den hohen Temperaturbereich von 1900 bis 2100 K) wurde als bestmögliche Korrelation für die Reproduktion der im großskaligen Phébus-Experiment erzielten Ergebnisse identifiziert /Trambauer et al. 2009/. Auf Basis dieser experimentellen Daten werden die zuvor genannten Korrelationen ebenfalls für das Modell des generischen KONVOI angewandt.

Es wird eine anfängliche Oxidationsschicht von 5 μm auf der Hüllrohraußen- und -innenseite angenommen (OXLAY = $5 \cdot 10^{-6}$ und OXIDIN = 1,0). Auf der Hüllrohrinnenseite wird eine weitere Oxidation vernachlässigt (kein Flowering-Effekt, Parameter TFLOWR = 10^{10}).

Der Faktor g in Gleichung 4.9 bildet die Reduktion der Oxidationsrate infolge Dampf mangels ab (Steam starvation):

$$g = \begin{cases} 0 & \text{falls } x_h \leq 0 \\ 10 \cdot (1 - (1.5 - 0.6 \cdot x_h) \cdot x_h) \cdot x_h^3 & \text{falls } 0 < x_h < 1 \\ 1 & \text{falls } x_h \geq 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

mit

$$x_h = \frac{x_{\text{QM}} \cdot \left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{ges}}}\right)}{\text{OXXLIM}}, \quad (4.11)$$

wobei p_{ges} den Gesamtdruck (Pa), $p_{\text{H}_2\text{O}}$ den Partialdruck des Wasserdampfes (Pa) und x_{QM} den Dampf- und Gasanteil (dimensionslos) beschreiben. Der Eingabeparameter OXXLIM = 0,1 wurde entsprechend der Empfehlungen des ATHLET-CD-Handbuchs verwendet /Austregesilo et al. 2014/. Der Übergang von parabolischer zu linearer Oxidationskinetik wird vernachlässigt für die Oxidation der Brennstäbe (Pa-

parameter ROXLIM = 1,0). Die Oxidation durch Luft und die Bildung von Nitriden werden im vorliegenden Eingabedatensatz ebenfalls vernachlässigt.

Für die Oxidation von Brennstoffschmelze und Brennstoffkruste (wiedererstartete Schmelze) wird die Cathcart/Urbanic-Heidrick-Korrelation verwendet, wobei zu Beginn eine Oxidationsschichtdicke von 10^{-3} mm angenommen wird (Parameter OXLM0). Der Übergang zu einer linearen Oxidationskinetik erfolgt für Oxidschichtdicken auf den Schmelzesträhnen größer als 0,1 mm (Parameter ROXLMM).

Die Oxidation der Steuerstäbe wird ebenfalls mit der mit der Cathcart/Urbanic-Heidrick-Korrelation beschrieben. Zu Beginn wird für die Steuerstäbe dieselbe Oxidationsschichtdicke wie für die Brennstäbe angenommen (5 μ m, wie im ATHLET-CD-Handbuch empfohlen). Die Oxidation auf der Innenseite der Steuerstabführungsrohre wird vernachlässigt (ähnlich der oben beschriebenen Modellierung für die Brennstäbe).

4.2.1.8 Modellierung des Aufschmelzens von Kernmaterial und der Kernmaterialverlagerung

Die Verlagerung von Kernmaterial wird durch ein Schmelzesträhnenmodell (Candling-Modell) beschrieben, welches ursprünglich von Kronenberg entwickelt wurde /Kronenberg 2001/. Es basiert auf der Annahme von Schmelzesträhnen, die in dem Kontrollvolumen beginnen, für das Hüllrohrversagen vorhergesagt wird und dann abwärts entlang des repräsentativen Stabes bis in Kernregionen mit geringerer Temperatur laufen, wo das geschmolzene Material akkumuliert wird und partiell wiedererstartet /Austregesilo et al. 2007/.

Der Programmcode berechnet die Dicke der Schmelzesträhnen nach dem folgenden Zusammenhang /Austregesilo et al. 2014/¹:

$$\delta = \sqrt{\frac{3}{g} w_{l,\max} \nu_l} \quad (4.12)$$

wobei die maximale Fließgeschwindigkeit $w_{l,\max}$ (m/s) und die kinematische Viskosität ν_l (m^2/s) der metallischen Schmelze, der keramischen Schmelze und der Absorberstabschmelze im Eingabedatensatz zu spezifizieren sind.

Wiederaufschmelzen bereits erstarrten Materials und Blockadebildung basierend auf der Porosität wird berechnet (siehe Abschnitt 4.2.1.6). Eutektische Materialwechselwirkungen werden vernachlässigt. Das Hüllrohrversagen wird in Abhängigkeit von der Hüllrohrtemperatur und der Oxidschichtdicke definiert. Für Oxidschichtdicken $< 0,3$ mm ist die Versagenstemperatur gleich 2300 K spezifiziert, für Oxidschichtdi-

¹ Die Eingabeparameter DELSL, DSLUO und CRDELS müssen hierfür im Eingabedatensatz auf negative Werte (= Dummy-Werte) gesetzt werden.

cken > 0,3 mm gleich 2500 K. Als Schmelztemperatur (Solidustemperatur) des mit metallischen Einschlüssen versehenen UO_2 wird 2600 K angenommen, sowie 2800 K als Liquidustemperatur. Als Schmelztemperatur des Absorbermaterials ist 1073 K im Eingabedatensatz festgelegt (AgInCd-Absorbermaterial). Die Schmelztemperatur der Steuerstäbe und Steuerstabführungsrohre beträgt 1523 K. Alle im ECOPE-Modul spezifizierten Temperaturen sind in Abb. 4.4 aufgetragen.

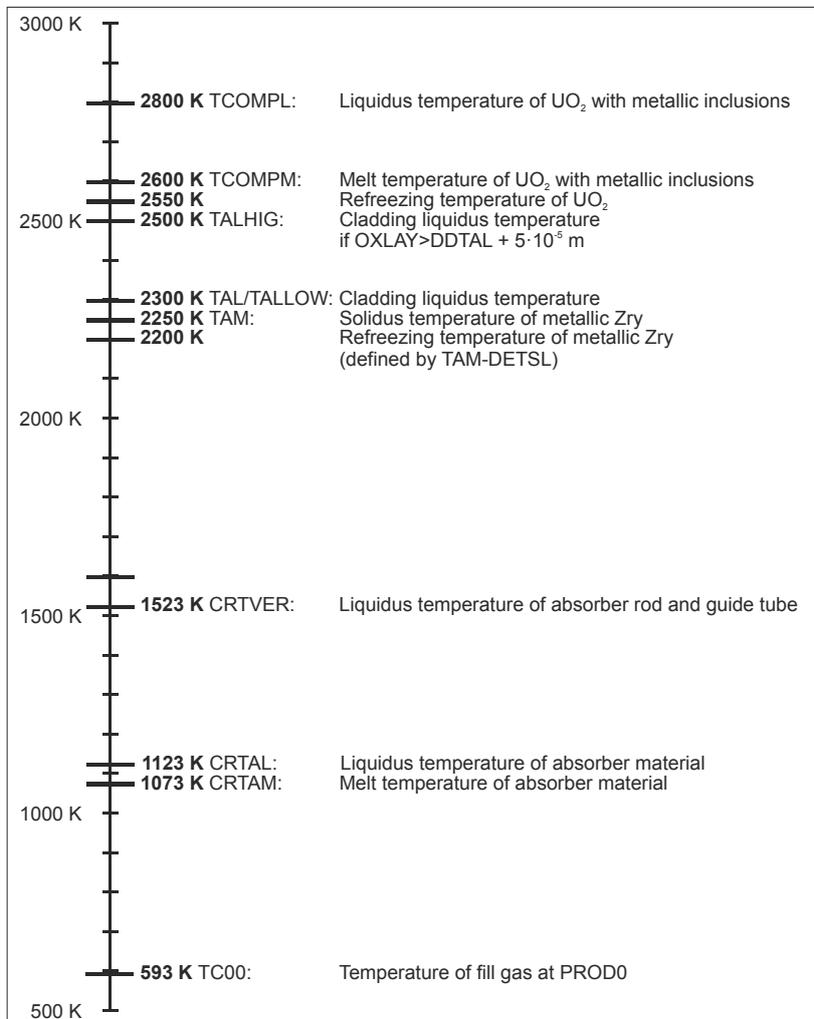


Abb. 4.4: Im Eingabedatensatz des generischen KONVOI für das ECOPE-Modul spezifizierte Temperaturen

4.2.2 Quench-Front-Modul (CW QUENCHCORE)

Das Quenchfront-Modell beschreibt die Wärmeübertragungsprozesse während des Wiederflutens eines teilweise oder vollständig freigelegten Reaktorkerns.

Während der Phase des Wiederflutens können entlang der freigelegten heißen Brennstäbe sehr große Temperaturgradienten auftreten (> 1000 °C im Bereich der freigelegten Brennstäbe und etwa bei Sättigungstemperatur von Wasser im bereits gefluteten Bereich). Zusätzlich treten im Bereich des Wiederbenetzens große lokale Wärmeströme auf. Um diese Phänomene mit ausreichender Genauigkeit zu modellieren, ist ein sehr feines Rechengitter mit Nodelängen in der Größenordnung von

1 mm notwendig. Tatsächlich werden in der aktiven Kernzone jedoch Nodelängen von 19,5 cm verwendet (Aufteilung der aktiven Zone in 20 Nodes), was einen Kompromiss zwischen Rechengenauigkeit und CPU-Zeitverbrauch darstellt und für die meisten Reaktorzustände (z.B. stationärer Nominalzustand, langsames Ausdampfen) ausreichend genau ist. Für schnell ablaufende Prozesse mit großen Temperaturgradienten ist die Rechengenauigkeit eines solchen Gitters nicht ausreichend und es wird die Verwendung des Quenchfrontmodells empfohlen /Austregesilo et al. 2012, S. 7-67 ff./. Dabei werden die Positionen der oberen und unteren Quenchfront auf Basis von analytischen Korrelationen ermittelt und dabei sowohl die axiale Wärmeleitung als auch die Vorkühlung der heißen Oberflächen in der Nähe der Quenchfront einbezogen. Eine detaillierte Beschreibung des Quenchfrontmodells findet sich in /Austregesilo et al. 2012/.

Im Eingabedatensatz wird für jeden repräsentativen Brennstab und Steuerstab eine Quenchsektion definiert (insgesamt 11 Quenchsektionen). Die Verwendung des Quenchfrontmodells wird durch ein Signal gesteuert, das für jede Sektion separat definiert werden kann (Parameter AQFSIG). Im aktuellen Eingabedatensatz wird das Quenchfront-Modell für alle Quenchsektionen initialisiert, sobald der Primärkreisdruck unter 3,0 MPa sinkt.

Zur Berechnung der unteren Quenchfront wird die Semeria/Martinet-Korrelation /Semeria, Martinet 1967/ und zur Berechnung der oberen Quenchfront die Yamano-uchi-Korrelation /Yamanouchi 1968/ verwendet. Die maximale Quenchfrontgeschwindigkeit sowie die maximalen Wärmeübertragungskoeffizienten (h_{QF}) wurden entsprechend der Empfehlungen des ATHLET-Benutzerhandbuchs gesetzt (1,0 m/s für die maximale Geschwindigkeit, $3,0 \cdot 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ für den h_{QF} der unteren Quenchfront und $3,0 \cdot 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ für den h_{QF} der oberen Quenchfront.

Für die Verwendung des Modells gelten einige Einschränkungen. So ist dieses Modell in der für dieses Projekt offiziell freigegebenen Programmversion ATHLET-CD 3.0A bislang nur teilweise getestet und nur für das Wiederfluten bei auslegungsgemäßen Unfallbedingungen validiert /Austregesilo et al. 2013/.

4.2.3 Modul OREST

Dieses Modul enthält den stationären Teil des Nuklid-Programm-Systems von ATHLET-CD und berechnet für Leichtwasserreaktoren das Nuklidinventar in den Brennstäben. Das seit Version 2.2A in ATHLET-CD enthaltene eindimensionale Raumzellen-Abbrand-Programm basiert dabei auf einer früheren GRS-Entwicklung /Hesse et al. 1993/.

OREST besteht aus zwei Programmteilen: dem Abbrandcode ORIGEN sowie dem Programm HAMMER zur Berechnung von Neutronenfluss und effektiven Wirkungsquerschnitten. ORIGEN ermittelt dabei den Aufbau und Zerfall der einzelnen Radionuklide durch Lösen von Differentialgleichungen. HAMMER berechnet den Neutro-

nenfluss und die Wirkungsquerschnitte für insgesamt 84 Energiegruppen (30 Gruppen thermischer Neutronen und 54 Gruppen epithermischer sowie schneller Neutronen). Das übergeordnete OREST transformiert diese Werte auf die in ORIGIN benötigten drei Energiegruppen (thermische Neutronen bis 0,5 eV, Resonanzbereich und schnelle Neutronen über 1 MeV). Die Berechnung der Nukliddaten basiert dabei auf der Nukliddatenbank ENDF/B-V /England et al. 1984/.

Im Eingabedatensatz für den generischen KONVOI ist ein Brennstofftyp definiert: UO₂-Brennstoff mit 4 % U-235-Anreicherung. OREST führt für diesen Brennstoff die Abbrandrechnung mit gegebenen Zeitschritten aus und generiert dabei tabellarische Werte. Diese Daten werden von dem Modul FIPISO als Anfangswerte für die transiente Rechnung verwendet (siehe nächster Abschnitt).

Für die in diesem Vorhaben berechneten Transienten wurden die folgenden Abbrandzustände angenommen und im Eingabedatensatz spezifiziert:

- Beginn des ersten Zyklus (BOC), nach 6 Tagen bei Nominalleistung (Abbrand = 0,2 GWd/t_{SM}),
- Ende des ersten Zyklus (EOC), nach 330 Tagen bei Nominalleistung (Abbrand = 12 GWd/t_{SM}).

Die Leistungsgeschichte wird durch tabellierte Werte vorgegeben (Tabelle FUEL_P als Leistung pro t_{SM}). Dabei ist ein konstanter Wert von 37,379 MW/t_{SM}, äquivalent zu 3850 MW Gesamtleistung implementiert.

Weiterhin sind im Eingabedatensatz die folgenden Brennstoffparameter gegeben:

- Dichte des UO₂,
- Molekulare Zusammensetzung,
- Nuklidzusammensetzung des angereicherten Urans,
- Massenprozent der im Brennstoff eingeschlossenen Elemente.

4.2.4 Modul FIPISO

Dieses Modul enthält den transienten Teil des Nuklidprogrammpakets. Es berechnet die Massen, Leistungsverteilung und Aktivitäten des Kernmaterials sowie der während der Transienten freigesetzten Stoffe. FIPISO beschreibt dabei das Verhalten der Elemente/Isotope innerhalb des gesamten Primärkreises. Das Modul nutzt dabei Daten der Abbrandbibliothek von OREST sowie Daten von ATHLET, ECORE (HEAT) und FIPREM /Austregesilo et al. 2014/. Im generischen KONVOI-Modell erfolgt der Beginn der FIPISO-Rechnung über ein GCSM-Signal direkt nach Auslösen der RESA.

Im Eingabedatensatz sind weiterhin die folgenden Parameter definiert:

- Stationäre Reaktorleistung (3850 MW),

- Abbrand für jede Kernsektion (zwei Optionen sind implementiert, BOC und EOC, siehe Abschnitt 4.2.3),
- Option zur Reduzierung der CPU-Rechenzeit (FIPISO-Rechnung wird ausgeführt nach 20 Rechenschritten, einer Leistungsänderung von 1,0 W oder wenn mehr als 15 s Systemzeit vergangen sind).

4.2.5 Modul der Spaltproduktfreisetzung (CW FIPREM)

Das Modul beschreibt die Freisetzung von Spaltprodukten sowie Material aus den Absorberstäben (Ag, In, Cd) auf Basis von Ratenansätzen (Arrhenius-Gleichungen) bzw. für einige Materialien als Funktion der Partialdrücke. Folgende Optionen stehen in der ATHLET-CD Version 3.0A zur Verfügung /Bals et al. 2012, S. 109/:

- Freisetzungsraten gemäß ORNL-Daten (NUREG/CR-6261, /Lorenz, Osborne 1995/) und CORSOR-Daten für die Freisetzung von Silber (Ag), Indium (In) und Cadmium (Cd),
- Freisetzungsraten gemäß ORNL-Daten (NUREG/CR-6261) und als Funktion der Partialdrücke für die Freisetzung von Ag, In und Cd,
- Freisetzungsraten gemäß ORNL-Daten (NUREG/CR-6261) und als Funktion der Partialdrücke für die Freisetzung von Ag, In und Cd sowie der leicht flüchtigen Elemente Xenon (Xe), Caesium (Cs), Tellur (Te), Antimon (Sb), der mittel-flüchtigen Elemente Barium (Ba), Strontium (Sr), Ruthenium (Ru) und Molybdän (Mo) sowie der schwerflüchtigen Elemente Zirkonium (Zr), Uran (U) und Zinn (Zn).

Im aktuell vorliegenden Eingabedatensatz wurde die erste Option gewählt. Die Freisetzung der leicht flüchtigen Spaltprodukte (Xe, Kr, I, Cs) nach dem Bersten der Hüllrohre wird betrachtet, wobei das Bersten der Hüllrohre durch das mechanische Brennstabmodell berechnet wird (Hüllrohrdeformation, siehe Abschnitt 4.2.1.5).

Das Modell kann die Freisetzung von bis zu 24 Elementgruppen ermitteln, so dass die wesentlichen Spaltprodukte, Brennstoff, Actinide und Strukturmaterialien abgedeckt sind. Der Parameter GMURAN wurde auf 0,0 gesetzt, so dass der Programmcode die Gesamtmasse an Schwermetall (Uran) direkt aus der im ECORE-Modul gegebenen Geometriewerten und Dichten berechnet.

Das Modell ist mit einigen Einschränkungen versehen. So wurde in /Bals et al. 2012, S. 112/ die bei der Entwicklung von ATHLET-CD 3.0A zur Verfügung stehende Datenbasis für die Ermittlung der Freisetzungsraten als noch nicht ausreichend eingeschätzt².

² Weitere Verbesserungen in der Berechnung der Freisetzungsraten sind in der neuen ATHLET-CD-Version 3.1 enthalten.

4.2.6 Modul zur Simulation der Prozesse im unteren Plenum (CW AIDA)

AIDA modelliert die thermischen und mechanischen Prozesse während der späten In-Vessel-Phase nach Verlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum (engl. lower plenum, LP). Das Modul ist ein gekoppeltes integrales Simulationsmodell, das die folgenden Prozesse berechnet /Weber et al. 2014/:

- das thermische Verhalten des geschmolzenen Materials in der unteren Kugelkalotte,
- die Bildung von Kruste auf der Oberseite sowie der sphärischen Unterseite der Schmelze,
- die Kühlung der Schmelze durch eine transiente Zweiphasenströmung innerhalb des Spalts zwischen Kruste und Reaktordruckbehälterwand und
- das Versagen des RDB im unteren Plenum.

Das Modul wird nach der ersten Verlagerung von geschmolzenem Kernmaterial in das LP initialisiert. Dabei können verschiedene Szenarien der Verlagerung simuliert werden. Ein mögliches Szenario bei DWR-Störfällen ist das so genannte „nasse Szenario“, wie in /Bals et al. 2012, S. 47 ff./ beschrieben. In diesem Fall tritt die Verlagerung des geschmolzenen Kernmaterials nach einem Versagen der im Kern gebildeten Krusten auf und es kommt zur schrittweisen Verlagerung von aufgeschmolzenem Material (kontinuierlicher Prozess). Das verlagerte Material fällt in das noch nahezu mit Wasser gefüllte LP, bildet dort einen Schmelzesee, der weiterhin von Wasser bedeckt ist. Eine weitere Art der Verlagerung kann nach Versagen der Kerntrageplatte auftreten, wobei in kurzer Zeit große Mengen geschmolzenen Materials und sonstige Kerntrümmer in das LP verlagert werden (einmaliger Prozess).

Seit der Programmversion 3.0A können in ATHLET-CD Transienten mit einer kontinuierlichen Verlagerung von Kernmaterial simuliert werden (Parameter IDMTLP=1, der auch im vorliegenden Eingabedatensatz gewählt ist). Jedoch ist die genaue Modellierung des Beginns des Verlagerungsprozesses sehr komplex. Mit den in diesem Vorhaben verwendeten Programmversionen 3.0A und 3.0B konnte die Aufheizung der Kerngitterplatte durch Strahlungsaustausch nicht korrekt wiedergegeben werden (siehe /Jobst et al. 2016c, Anhang B.6/). Deshalb kann die Zeitdauer bis zum Versagen der Kerngitterplatte nicht vorhergesagt werden. Des Weiteren ist in ATHLET-CD kein Modell für das Versagen der Kruste des Schmelzepools im Kern enthalten. Deshalb wird die Schmelzemasse als solche herangezogen (ECORE-Parameter AMISUL = Summe der Schmelzmassen von Brennstoff, Hüllrohrmaterial, Absorberstäben und Führungsrohren) und daraus das GCSM-Signal M-MELT gebildet. M-MELT triggert den Switch MTLP, der wiederum die Verlagerung des Kernmaterials auslöst.

Das Vorhandensein keramischer Schmelze ist für den Beginn der Verlagerung sicherzustellen (ECORE-Parameter AMIKRL > 0). Deswegen muss ein geeigneter

Schwellwert für den GCSM-Switch MTLP bestimmt werden³. Nach dem Beginn der Verlagerungsprozedur wird eine kontinuierliche Verlagerung geschmolzenen Kernmaterials in das untere Plenum simuliert.

Es wird die Bildung eines homogenen Schmelzepools im unteren Plenum angenommen (keine Separation zwischen keramischen und metallischen Bestandteilen), der von Wasser bedeckt ist (AIDA-Konfiguration A12).

Der Schmelzepool wird durch ein null-dimensionales Modell mit Hilfe von Korrelationen beschrieben. Die RDB-Wand wird durch ein sphärisches Volumen entsprechend Abb. 4.5 modelliert (2-dimensionales Modell). Im Eingabedatensatz sind die Modellparameter wie folgt gesetzt:

- Anzahl der Zonen $N_{Zone} = 50$,
- Anzahl der Schichten $N_{Lay} = 10$,
- sphärischer Radius (innere Oberfläche) = 2,55 m /Ilg et al. 2008/,
- Wanddicke $r_{th} = 0,148$ m /Ilg et al. 2008/ und
- Wandmaterial: Reaktorbaustahl 20 MnMoNi 5 /Ilg et al. 2008/.

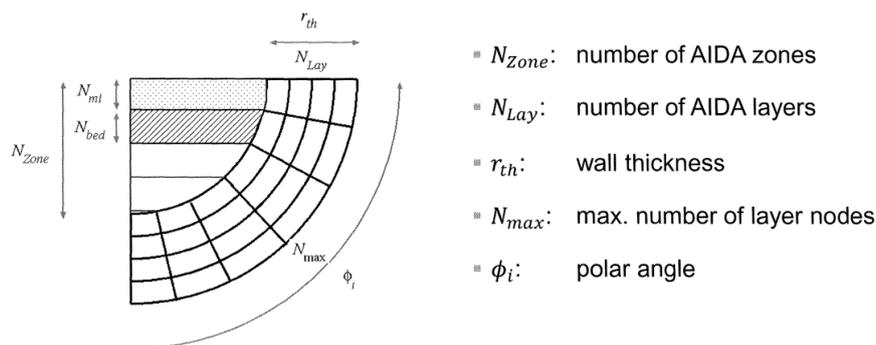


Abb. 4.5: Nodalisierung des unteren Plenums innerhalb des AIDA-Moduls /Weber et al. 2014/

Die ASTOR-Methode (Approximated Structural Time Of Rupture, /Eisert et al. 1993; Schimpfke et al. 2001/) wird verwendet, um das Versagen des RDB vorherzusagen.

Die folgenden Wärmeübergangsprozesse werden im unteren Plenum betrachtet:

- Wärmeübergang von der Schmelze zur oberen Kruste mit der Kelkar-Korrelation /Kelkar et al. 1993/,
- Wärmeübergang von der Schmelze zur unteren Kruste mit der Asfia-Dhir-Korrelation /Asfia, Dhir 1994/,

³ Für die vorliegenden Simulationen wird eine keramische Schmelzemasse von etwa 10 t als Minimum für eine Verlagerung angesetzt. Deswegen werden pro Szenario zwei Rechnungen durchgeführt. Ein erster Rechendurchlauf wird durchgeführt um den zeitlichen Verlauf der keramischen und der gesamten Schmelzemasse zu ermitteln. Daraus wird dann der AMISUL-Wert bestimmt, der mit einer keramischen Schmelzemasse von 10 t korrespondiert. Dieser Wert wird in dann für weitere Simulationen im Eingabedatensatz als MTLP-Schwellwert definiert.

- Wärmeübergang von der oberen Kruste zum Fluid im unteren Plenum mittels Konvektion und Wärmestrahlung zu den darüber liegenden Strukturen (AIDA Ausgabeparameter QUPTO, wobei der WÜ-Koeffizient durch AIDA berechnet wird),
- Wärmeübergang innerhalb des Spalts zwischen Kruste und RDB-Wand durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung (Spaltbreite 2 mm),
- Konvektiver Wärmeübergang auf der Außenseite des RDB (mit einem als konstant angenommenen WÜ-Koeffizienten von $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

Der Wärmeübergang an das Fluid im unteren Plenum ist durch ein GCSM-Bibliothekssignal verfügbar und wird an das TFO PV-LP über ein HEATADD-Modell eingekoppelt. Für die korrekte Einkopplung der Leistung in das TFO muss zudem der Skalierungsfaktor $Q0^4$ (Abschnitt INITCOND im Eingabedatensatz) gleich 0,4875 gesetzt werden.

Wird zu Beginn der Verlagerung in das untere Plenum die A12-Konfiguration (Wasserschicht oberhalb des Schmelzepools) spezifiziert, so behält AIDA diese Konfiguration bis zum Ende der Simulation bei. Da der der Wasserschicht zugeführte Wärmestrom typischerweise in der Größenordnung bis zu 10 MW liegt, wird die gesättigte Wasserflüssigkeit innerhalb relativ kurzer Zeit (Größenordnung etwa 1,5 h) vollständig verdampft und der entstehende Dampf durch das Leck oder die Sicherheitsventile ausgetragen. Sobald nur noch Dampf im LP vorhanden ist (Dampfgehalt = 1), wird dieser wegen seiner geringen Wärmekapazität sehr stark erhitzt und erreicht wegen der fehlenden Rückkopplung zum Schmelzepool teilweise unphysikalisch hohe Werte. Ein Programmabbruch erfolgt, sobald Dampftemperaturen größer 6000 °C auftreten. Um dies zu vermeiden, wurde eine GCSM-Logik implementiert, die die Aufheizung des Dampfes im unteren Plenum auf 1000 °C limitiert. Innerhalb des AIDA-Moduls verbleibt jedoch der Wärmeverlust über die obere Oberfläche des Pools unverändert in derselben Größenordnung, was eine nicht-konservative Wärmesenke darstellt. In Diskussion mit den ATHLET-CD-Codeentwicklern wurde festgestellt, dass die Versionen 3.0A und 3.0B keine Möglichkeit zur Lösung des Problems bereitstellen, da die gewählte Konfiguration im Eingabedatensatz fixiert ist /Hollands 2015/. Es besteht somit ein weiterer Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Modellierung von Störfallszenarien mit vollständigem Ausdampfen des unteren Plenums /Kliem et al. 2016/.

⁴ Wärmestrom pro Länge bei einer Gesamtlänge des TFO von 2,05 m.

5. Detaillierte Analyse ausgewählter Störfallszenarien

Innerhalb des Projektvorhabens wurden Simulationen aus zwei Störfallkategorien durchgeführt:

- Totalausfall der Stromversorgung inklusive Ausfall der Notstromversorgung (Station Blackout, SBO) und
- Kühlmittelverluststörfall mit kleinem Leck (SBLOCA).

Dabei wurden verschiedene Varianten von SBO und SBLOCA gerechnet, wobei die Verfügbarkeit der Not- und Nachkühlsysteme, sowie Anfangs- und Randbedingungen von Notfallmaßnahmen variiert wurden. Ausgewählte Szenarien wurden detailliert analysiert und in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die gerechneten Szenarien und ihre wesentlichen Annahmen.

Tabelle 5.1: Mit ATHLET-CD berechnete Szenarien für den generischen KONVOI

	SBO Basis- szenario (keine AMM)	SBO + PDE	SBLOCA Basis- szenario (Fall 1a)	SBLOCA modifiziertes Szenario (Fall 1b)	SBLOCA modifiziertes Szenario (Fall 1d)
Leckgröße	-	-	50 cm ²	50 cm ²	50 cm ²
Leckposition	-	-	kalter Strang	kalter Strang	kalter Strang
PDE	nein	ja	nein	nein	nein
Sekundärseitiges Abfahren 100 K/h	Teilabfahren	Teilabfahren	ja	nein	nein
Verfügbarkeit der HD-Einspeisung	nein	nein	ja	ja	nein
Verfügbarkeit der ND-Einspeisung	nein	nein	ja	ja	ja
Versagen des Sumpfumwälz- betriebs	n/a	n/a	ja	ja	ja
Verfügbarkeit der Druckspeicher (DS)	ja	ja	ja	ja	ja
Isolation der kaltsei- tigen DS	nein	nein	ja	ja	ja
DE-Notbespeisung	nein	nein	ja	ja	ja

5.1 Stationäre Lösung des Modells

Im Allgemeinen sollte vor dem Ausführen einer transienten ATHLET-CD-Rechnung ein stationärer Anlagenzustand gefunden werden. Das bedeutet, dass die Energie-, Massen- und Impulsbilanzen in allen Teilen des Systems erfüllt sein müssen und dass die Zeitableitungen der ATHLET-Lösungs-Variablen möglichst verschwinden /Lerchl et al. 2012/. Dabei soll dieser Zustand den gegebenen Daten der realen Anlage, wie Reaktorleistung, Dampferzeugerleistung, Temperaturen und Massenströme entsprechen.

Die Einstellung des stationären Anlagenzustandes erfolgt für das Modell des generischen KONVOI in zwei Schritten:

1. Stationäre Rechnung (ATHLET Steady State Calculation SSC) mit einem vereinfachten, algebraischen 4-Gleichungssystem,
2. Anschließend Nulltransiente mit 6-Gleichungssystem.

Wegen eines Fehlers in der Programmversion ATHLET-CD 3.0A (unberücksichtigte Pumpenleistung in der Energiebilanz bei Verwendung des dynamischen Pumpenmodells mit Drehzahlregelung /GRS 2016/, siehe auch /Jobst et al. 2016c, Anhang B.1/), wurde die stationäre Lösung/Nulltransiente mit der Programmversion 3.0B berechnet, worin die Drehzahlregelung fehlerfrei gerechnet wird. Der gefundene stationäre Wert der Drehzahl von 1523 1/min wurde nachfolgend als konstanter Wert in Simulationen mit der Programmversion 3.0A verwendet.

Die Ergebnisse der Nulltransiente (Dauer 2500 s, durchgeführt mit ATHLET-CD 3.0B) sind in den Abb. 5.1–5.12 dargestellt. Während der ersten 2000 s kommen spezielle GCSM-Regler zur Einstellung des stationären Zustandes zum Einsatz (siehe /Jobst et al. 2016c, Abschnitt 2.1.3.2/). Zum Zeitpunkt $t = 2000$ s erfolgt die Abschaltung dieser Regler und es wird nachfolgend überprüft, ob der stationäre Zustand weitere 500 s aufrechterhalten werden kann. Durch diese Prozedur werden für die nachfolgende transiente Rechnung stabile Anfangsbedingungen erreicht, die mit den gegebenen Parametern der realen Anlage gut übereinstimmen (siehe Tabelle 5.2).

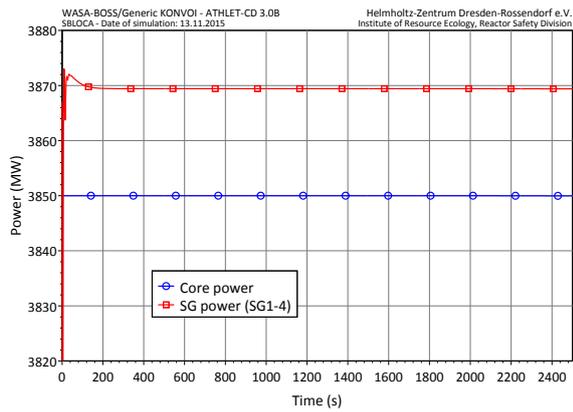


Abb. 5.1: Stationärer Zustand. Kernleistung und DE-Leistung

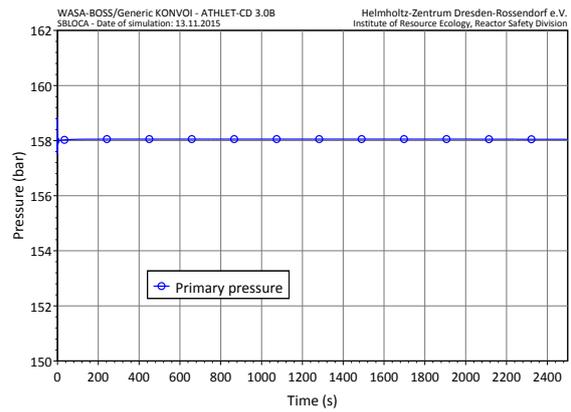


Abb. 5.2: Stationärer Zustand. Druck im Primärkreis

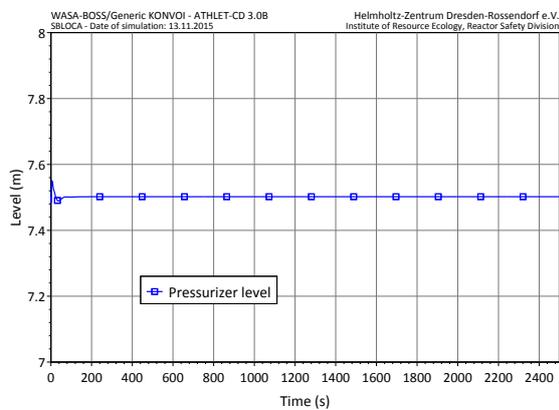


Abb. 5.3: Stationärer Zustand. Druckhalterfüllstand

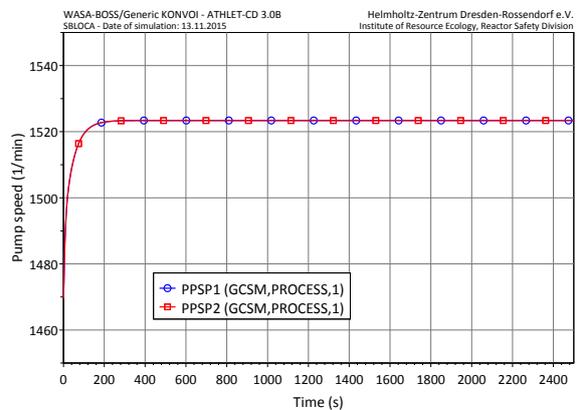


Abb. 5.4: Stationärer Zustand. Drehzahl der HKMP

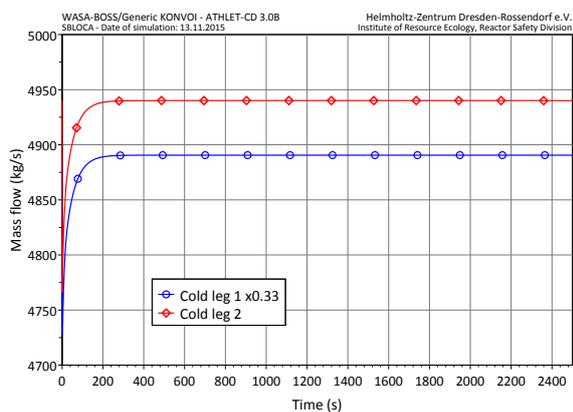


Abb. 5.5: Stationärer Zustand. Massenstrom in den kalten Strängen

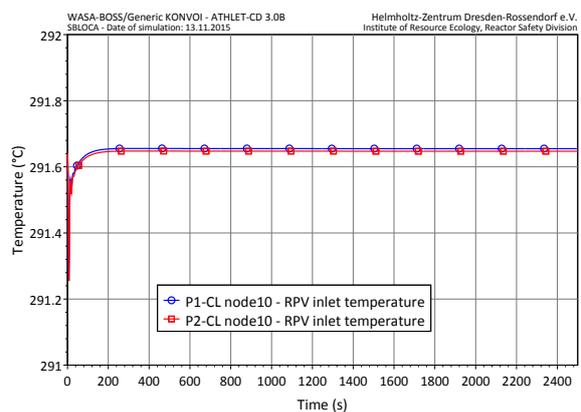


Abb. 5.6: Stationärer Zustand. RDB-Eintrittstemperaturen

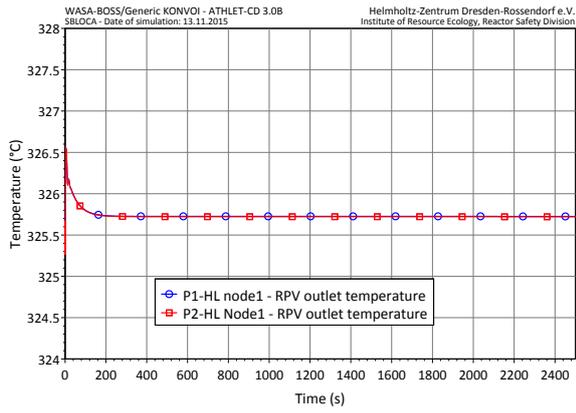


Abb. 5.7: Stationärer Zustand. RDB-Austrittstemperaturen

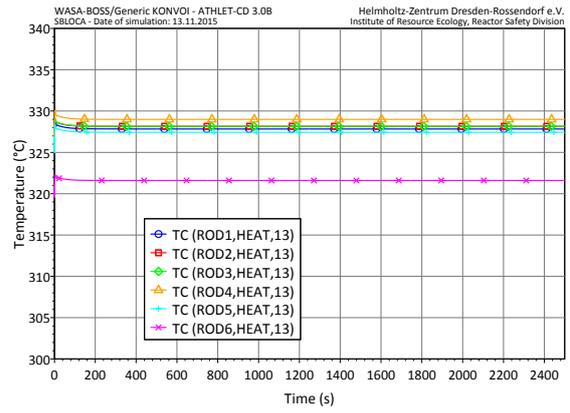


Abb. 5.8: Stationärer Zustand. Hüllrohrtemperaturen in den 6 Kernsektionen

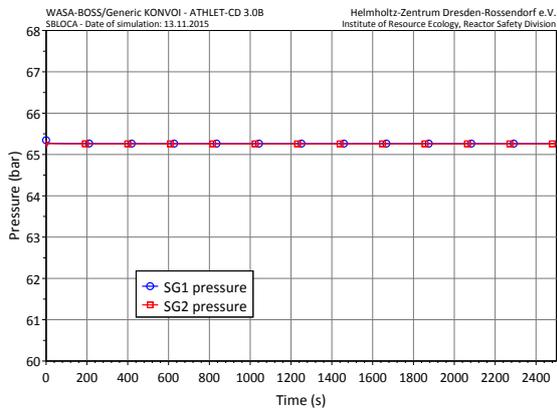


Abb. 5.9: Stationärer Zustand. Dampferzeugerdruck

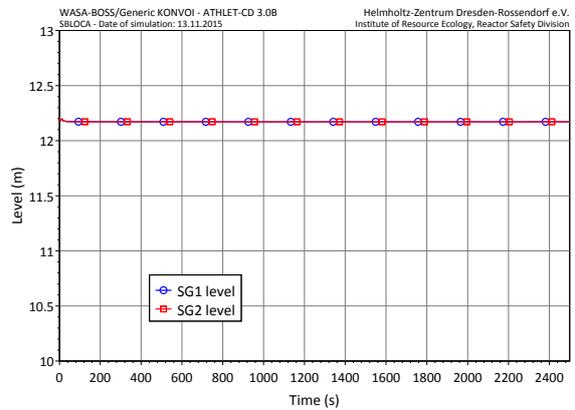


Abb. 5.10: Stationärer Zustand. Dampferzeugerfüllstand

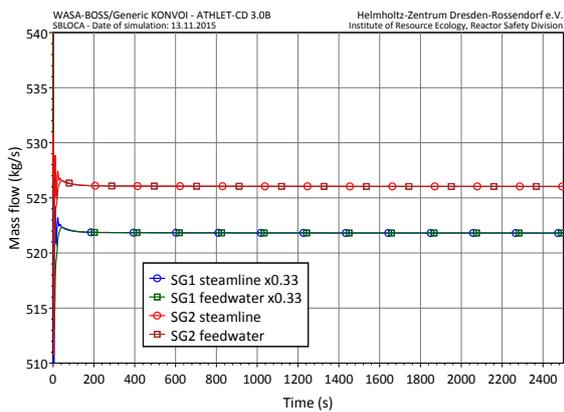


Abb. 5.11: Stationärer Zustand. Speisewassermassenströme und Frischdampfmassenströme

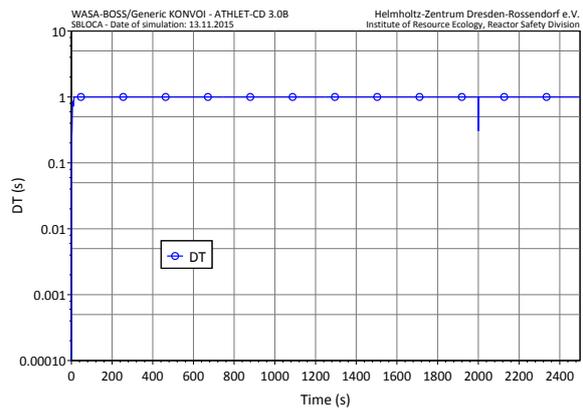


Abb. 5.12: Stationärer Zustand. Zeitschrittweite der Simulation

Tabelle 5.2: ATHLET-CD-Rechnung für den generischen KONVOI. Vergleich der stationären Lösung mit Anlagendaten

Parameter	Einheit	Messwert	ATHLET-CD	Abweichung
Reaktorleistung ⁵	MW	3850	3850	0,000 %
DE-Leistung	MW	n/a	3869,4	n/a
Druck im oberen Plenum des RDB ⁶	MPa	15,80	15,804	0,025 %
DH-Füllstand ⁷	m	7,5	7,5	0,000 %
RDB-Eintrittstemperatur	°C	291,7	Loop 1/2: 291,66	-0,020 %
RDB-Austrittstemperatur	°C	325,6	325,72	0,040 %
Gesamter Kühlmittelmassenstrom ⁸	kg/s	19760,0	19758,6	-0,007 %
Drehzahl HKPM	1/min	1500,0	1523,4	1,56 %
Druckerhöhung in der HKPM	MPa	n/a	0,7139	
DE-Druck (sekundärseitig)	MPa	6,60	6,526	-1,12 %
DE-Füllstand	m	n/a	12,17	n/a
Speisewassermassenstrom	kg/s	2100	Gesamt: 2107,10 1/3 von Schleife 1: 527,02 Schleife 2: 526,04	0,34 %
Frischdampfmassenstrom	kg/s	2100	Gesamt: 2107,10 1/3 von Schleife 1: 527,02 Schleife 2: 526,04	0,34 %

⁵ Wert ist im Eingabedatensatz gegeben und wird während der Nulltransiente konstant gehalten.

⁶ Während der Nulltransiente wird dieser Wert durch den an den Druckhalter angeschlossenen Druckregler angepasst.

⁷ Während der Nulltransiente wird dieser Wert durch eine DH-Füllstandsregelung konstant gehalten.

⁸ Während der Nulltransiente wird die Pumpendrehzahl derart angepasst, dass der gegebene Gesamtkühlmitteldurchsatz im Modell erreicht wird.

5.2 Simulationen zu Kühlmittelverluststörfällen mit kleinem Leck (SBLOCA)

5.2.1 Definition der Szenarien

Für das Basis-SBLOCA-Szenario mit 50-cm²-Leck wurden die folgenden Annahmen und Randbedingungen zugrunde gelegt (entsprechend von Empfehlungen der RSK /RSK 2005/):

- 50-cm²-Leck im kalten Strang zwischen Hauptkühlmittelpumpe und RDB (Schleife 2).
- Nach Störfalleintritt wird der Notstromfall unterstellt, d. h. die Hauptkühlmittelpumpen laufen aus und die Notstromversorgung startet zeitverzögert (Zuschalten der Dieselgeneratoren nach 40 s).
- Das sekundärseitige Abfahren mit 100 K/h und die Notspeisewasserversorgung der Dampferzeuger sind verfügbar.
- 2 Notstromdiesel sind unverfügbar, damit fallen 2 Notkühlsysteme (HD- und ND-Pumpen) aus, von den verfügbaren Systemen speist ein System in die Leckschleife. Die Hochdruckeinspeisung erfolgt in den heißen Strang.
- Alle 8 Druckspeicher stehen zur Verfügung, die kaltseitigen Druckspeicher werden 500 s zeitverzögert vom NKV-Signal abgesperrt.
- Nach Entleerung der Flutbecken durch die HD-/ND-Einspeisung wird angenommen, dass die Umschaltung auf Sumpfumwälzbetrieb versagt.
- Als Kriterium für den Beginn der Kernverlagerung in das unter Plenum wurde das Auftreten von etwa 10 t keramischer Schmelze (AMIKRL) gesetzt.

Aufbauend auf diesem Szenario wurden insgesamt 3 Szenarien detailliert untersucht (siehe auch Tabelle 5.1). Die Bezeichnung und die Auswahl der weiteren Randbedingungen gleicht der bereits dargestellten ATHLET-Parameterstudie (siehe Kapitel 3):

- Basisszenario wie oben definiert (SBLOCA Fall 1a),
- SBLOCA-Szenario Fall 1b, identisch mit dem Basisszenario, aber ohne sekundärseitiges Abfahren,
- SBLOCA-Szenario Fall 1d, identisch mit Fall 1b, aber mit vollständigem Ausfall der HD-Sicherheitseinspeisung.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Abb. 5.13–5.38 zusammengestellt und werden nachfolgend diskutiert.

5.2.2 Ergebnisse der Simulationen mit ATHLET-CD 3.0A

Die Transiente beginnt bei Nominalbedingungen. In allen SBLOCA-Szenarien beginnt der Störfall durch Öffnen des Lecks zum Zeitpunkt $t = 1,0$ s. Der Druck im Primärkreis fällt ab und das Signal $p_{\text{primär}} < 132$ bar führt zur RESA bei $t = 22,7$ s, gefolgt von TUSA. Für die betrachteten Szenarien wird angenommen, dass die Um-

schaltung zu externer Stromversorgung fehlschlägt. In der Folge laufen die HKMP aus und es kommt mit einer Zeitverzögerung von 40 s zum Hochlaufen der Notstromdieselgeneratoren.

Etwa 1,2 s nach Lecköffnung wird die maximale Ausströmrate von etwa 580 kg/s erreicht (Abb. 5.17). Die Ausströmung führt zu einer Reduktion des Primärkreisdrucks, wodurch die Ausströmrate wiederum reduziert wird. Der Druck fällt innerhalb von 70 s nach Lecköffnung bis auf Sättigungsdruck (≈ 91 bar, Abb. 5.15) ab, wobei sich die Ausströmrate auf ungefähr 50 % ihres Maximalwertes reduziert.

Sobald das Signal $p_{\text{primär}} < 132$ bar aktiviert ist, wird im Basis-SBLOCA-Szenario (Fall 1a) die sekundärseitige Abfahrprozedur mit 100 K/h eingeleitet, wohingegen für die beiden Szenarien 1b und 1d diese Prozedur als nicht verfügbar angenommen wird. Der Verlauf des Basisszenarios wird zuerst dargestellt und anschließend werden die für die anderen beiden Fälle gefundenen Unterschiede diskutiert. Die Bilder 5.13–5.38 geben einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der wichtigsten Parameter aller drei KMV-Störfälle.

Das Abfahren der DE erfolgt mittels Dampfabgabe über die DE-Entlastungsventile und führt zu einer Reduzierung des sekundärseitigen DE-Drucks (Abb. 5.16). Wegen Wärmetransport von der Primär- zur Sekundärseite beginnt ebenfalls der Primärkreisdruck abzusinken. Durch die kontinuierliche Dampfabgabe und den Ausfall der Speisewasserversorgung kommt es zum Absinken der DE-Füllstände (Abb. 5.23). Bei Unterschreitung des Füllstands von 5 m erfolgt die DE-Notbespeisung bis auf Nominallevel ($12,2 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$). Die Füllstände verharren für den restlichen Verlauf der Transiente auf diesem Niveau.

Bei Anstehen des NKV-Signals (2v3 Notkühlkriterien, siehe Abb. 3.1) und hochgelaufenen DG werden die HD-Sicherheitseinspeisepumpen aktiviert (etwa 63 s nach Beginn). Da der Druck bereits unter den maximalen Förderdruck von 110 bar gesunken ist, beginnt die HD-Einspeisung sofort (Abb. 5.19). Die passiven Druckspeicher speisen ein, sobald der Primärkreisdruck unter 26 bar fällt (Abb. 5.22). Die Not- und Nachkühlpumpen beginnen mit der Einspeisung nachdem der Primärkreisdruck unter 10 bar gesunken ist (Abb. 5.20). Nach Leerlaufen der Flutbecken (Abb. 5.21) wird ein Ausfall des Umschaltens auf Sumpfbetrieb angenommen, so dass die aktiven Einspeisesysteme nicht weiter einspeisen.

Nachdem Ende aller aktiven und passiven Einspeisungen (ungefähr 80 min nach Beginn des Störfalls) kann die Nachzerfallswärme weiterhin über eine Naturumlaufzirkulation abgeführt werden – mit dem Kern als tiefergelegene Wärmequelle und den DE als höhergelegenen Wärmesenken. Durch das im kalten Strang von Schleife 2 nah des RDB-Eintritts gelegene Leck erfährt die Strömung eine Vorzugsrichtung und es bildet sich ein größerer Massenstrom in dieser Schleife aus, wohingegen in Schleife 1 eine oszillierende Strömung festgestellt werden kann (Abb. 5.14).

Zwei Stunden nach Eintreten des Lecks ist der Primärkreisdruck auf 2 bar abgesunken und verbleibt auf diesem niedrigen Niveau. Als Folge stellt sich ebenfalls ein niedriger Leckagemassenstrom von gemittelt 1,95 kg/s für die verbleibenden 6 h der gerechneten Transiente ein (mit Massenstrompeaks von 10 kg/s). Deswegen wird das Gesamtkühlmittelinventar des Primärkreises langsam von 178 t auf 139 t reduziert und der RDB-Füllstand kann für diesen Zeitraum knapp unterhalb des heißen Strangs gehalten werden ($\approx 8,5$ m, langsam fallend, Abb. 5.25).

Acht Stunden nach RESA ist die NZW auf 27,5 MW abgeklungen. Wie Abb. 5.13 verdeutlicht, kann die Leistung weiterhin über die DE sowie das Leck abgeführt werden. Der wesentliche Anteil in Höhe von 70 % wird dabei über den DE2 (Schleife mit Leck) abgeführt, ein kleinerer Anteil von etwa 20 % über den DE1 und der Rest von etwa 10 % über das Leck. Ungefähr 2 Stunden nach Lecköffnung ist die Brennelementaustrittstemperatur auf 120 °C abgesunken und bleibt die folgenden 6 Stunden unterhalb dieses Wertes (Abb. 5.26). Die Brennstofftemperaturen bleiben ebenfalls gering (Abb. 5.27, Abb. 5.28) und es erfolgt keine Oxidation der Hüllrohre (keine Wasserstofffreisetzung, siehe Abb. 5.29).

Im weiteren Verlauf der Transiente wird ein Zusammenbrechen des Naturumlaufprozesses erwartet, jedoch ist die Dauer bis zum Ende des Naturumlaufes a priori nicht vorherzusehen. Wegen des hohen CPU-Rechenzeitbedarfes⁹ wurde von einer erforderlichen Erweiterung der Simulationszeit abgesehen.

Für den Fall 1b ist das sekundärseitige Abfahren nicht verfügbar und der Sekundärdruck bleibt hoch (Abb. 5.16). Der Primärkreisdruck fällt langsamer ab als im Fall 1a (Abb. 5.15). Dadurch erfolgt die Druckspeichereinspeisung um 8 min und die ND-Einspeisung um 30 min im Vergleich zu Fall 1a verzögert. Nach Ende der aktiven und passiven Einspeisung (ca. 90 min nach Lecköffnung) erhöht sich der Primärkreisdruck aufgrund der Dampfproduktion wieder auf bis zu 26 bar und es dauert weitere 2 h, bis der Druck erneut unter 10 bar absinkt (Abb. 5.15).

Bis zum Leerlaufen der Flutbecken und Druckspeicher wird der Massenstromverlust des Primärkreises durch die HD-, ND- und Druckspeichereinspeisung kompensiert. Während dieser Phase verbleibt der RDB-Füllstand etwa auf der Höhe des heißen Stranges und der Reaktorkern ist weiterhin mit Wasser bedeckt (Abb. 5.25). Da der DE als Wärmesenke nicht mehr zur Verfügung steht (kein sekundärseitiges Abfahren), bildet sich im Gegensatz zu Fall 1a kein neuer Naturumlauf aus. Demzufolge wird die NZW im Wesentlichen über das Leck abgeführt. Aufgrund des im Vergleich zu Fall 1a höheren Primärkreisdruckes liegt ebenfalls ein höherer Leckmassenstrom (Abb. 5.17) vor und der RDB-Füllstand sinkt wesentlich schneller ab (Abb. 5.25). Es beginnt die Kernaufheizung und etwa 3 h nach Beginn wird eine BAT von 400 °C

⁹ 4 ½ Tage Rechenzeit auf einer Intel-CPU mit 3,3 GHz für die ersten 8 h der Transiente

erreicht. Nur 13 min später wird bereits das Kriterium zum Übergang zu einem schweren Störfall erreicht (SAMG-Signal bei BAT = 650 °C, Abb. 5.26).

Bereits ab $t = 162$ min nach Beginn (d. h. noch vor Anstehen des SAMG-Signals) beginnt die Hüllrohroxidation mit Freisetzung von Wasserstoff, zunächst mit geringen Freisetzungsraten, jedoch kontinuierlich ansteigend (Abb. 5.29). Das Absorbermaterial beginnt bei $t = 193$ min aufzuschmelzen, gefolgt von dem Bersten der Brennstoffhüllrohre, Freisetzung von Spaltprodukten und dem Aufschmelzen des Brennstoffs innerhalb der nächsten 11 min. Die Brennstofftemperaturen im oberen Bereich der inneren und äußeren Kernsektion sind in Abb. 5.27 und Abb. 5.28 dargestellt, wobei das plötzliche Absinken den Moment der Brennstoffverlagerung kennzeichnet.

Etwa 3 h 40 min nach Beginn der Transiente erreicht die Masse des aufgeschmolzenen keramischen Materials (AMIKRL) 10 t. Die Gesamtmasse der Schmelze (AMISUL) beträgt zu diesem Zeitpunkt 35 t (Abb. 5.31). Dieser Wert ist im Eingabedatensatz als Kriterium für den Beginn der Schmelzeverlagerung in das LP und den Start des Moduls AIDA spezifiziert (siehe Abschnitt 4.2.6). Mit der Verlagerung in das LP wird dort die Bildung eines homogenen Schmelzepools angenommen, der von einer Wasserschicht bedeckt ist. Nach der ersten Verlagerung hat der Schmelzepool eine Höhe von etwa 0,5 m und ein Volumen von etwa 2,5 m³. Durch weitere Verlagerung von geschmolzenem Kernmaterial kommt es zu einem kontinuierlichen Ansteigen der Schmelzepoolhöhe (Abb. 5.32). Aufgrund des großen Wärmestroms vom Schmelzepool zu der bedeckenden Wasserschicht (im Maximum 11 MW, siehe Abb. 5.33), wird das Wasser innerhalb von 100 min nach der Schmelzeverlagerung verdampft (Abb. 5.35). Durch die Schmelze im unteren Plenum beginnt die Aufheizung der RDB-Wand (Abb. 5.36) und nachfolgende Schädigung der RDB-Wand. Das Versagen des RDB wird von der ATHLET-CD-Simulation etwa 7 h 30 min nach Störfallbeginn vorhergesagt (Abb. 5.37).

Das SBLOCA-Szenario mit Ausfall der HD-Sicherheitseinspeisung (Fall 1d) führt zu einer wesentlich früheren Kernaufheizung und Kernzerstörung. Bereits 15 min nach der Öffnung des Lecks bricht der Flüssigkeitsmassenstrom durch das Leck zusammen und es strömt ab diesem Zeitpunkt hauptsächlich Dampf aus. Zu Beginn dieser Transiente fällt der Druck stärker als in Fall 1b und bei $t = 41$ min beginnt die Druckspeichereinspeisung (etwa 3 min früher als in Fall 1b). Im Gegensatz zu Fall 1b ist diese passive Einspeisung jedoch weniger effektiv und wird bereits 10 s nach der ersten Einspeisung unterbrochen und es kommt nachfolgend zu periodischen, aber kurzzeitigen Druckspeichereinspeisungen (siehe Abb. 5.22). Ab diesem Zeitpunkt fällt der Primärkreisdruck nur sehr langsam ab und es dauert etwa 2 h 10 min, bis der Druck unter 10 bar absinkt und daraufhin die ND-Pumpen einspeisen können. (siehe Abb. 5.20).

In der Zwischenzeit sinkt der Füllstand im RDB kontinuierlich ab (Abb. 5.25), der Beginn der Hüllrohroxidation ist bereits ab $t = 28$ min zu verzeichnen und 8 min später

erreicht die BAT 650 °C (Anstehen des SAMG-Signals), gefolgt vom Aufschmelzen des Absorbermaterials ($t = 38$ min), dem Bersten der Brennstabhüllrohre mit Freisetzung von Spaltprodukten ($t = 42$ min) und Brennstoffschmelzen ($t = 46$ min). Die Kernschmelze erreicht etwa 100 min nach Beginn eine keramische Schmelzemasse (AMIKRL) von 10 t bei einer Gesamtschmelzemasse (AMISUL) von 35 t, was im Eingabedatensatz als Kriterium für den Beginn der Verlagerung in das LP definiert ist.

Wie im Fall 1b wird im LP ebenfalls die Bildung eines homogenen Schmelzepools angenommen, der von einer Wasserschicht bedeckt ist. Im Gegensatz zu Fall 1b werden jedoch innerhalb von 8 h nur 33 t Kernmaterial (20 %) in das LP verlagert. Dies kann wie folgt erklärt werden: Die Flutbecken sind bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht leergelaufen (Abb. 5.21) und deshalb speisen die ND-Pumpen intervallweise kaltes Wasser in den Primärkreis ein (Abb. 5.20). Aus diesem Grund bleibt nach der ersten Kernmaterialverlagerung ins LP die Kühlmitteltemperatur unter 2000 °C (Abb. 5.26). Damit kann das im Kern verbliebene restliche Brennstoffinventar verhältnismäßig gut gekühlt werden (unterhalb Schmelztemperatur, siehe Abb. 5.28). Folglich ist nur ein geringes Fortschreiten der Kernschmelze zu beobachten und etwa 4 h nach Beginn wird das Fortschreiten vollständig gestoppt (Abb. 5.31).

Damit ist die im LP freigesetzte NZW wesentlich geringer als im Fall 1b (ungefähr 3 MW, siehe Abb. 5.33). Der Großteil der NZW kann über die aufliegende Wasserschicht abgeführt werden, die innerhalb von 68 min nach Verlagerung vollständig verdampft (Abb. 5.35). Wie bereits in Abschnitt 4.2.6 diskutiert, kann die aktuelle ATHLET-CD-Programmversion keinen Übergang von einem mit Wasser bedeckten Schmelzepool zu einem unbedeckten Schmelzepool rechnen. Folglich verbleibt der Wärmestrom zum Fluid im LP auf hohem Wert und gleicht damit einer Wärmesenke, die eine weitere Aufheizung des Schmelzepools verhindert. Dennoch setzt ab etwa 70 min nach Verlagerung die Schädigung der RDB-Wand ein (2 h 50 min nach Beginn der Transiente), doch dauert es weitere 2 h 50 min bis zum Versagen des RDB (5 h 40 min nach Beginn der Transiente).

Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Ereignisse während der drei betrachteten SBLOCA-Szenarien.

Tabelle 5.3: Wesentliche Ereignisse während der SBLOCA-Szenarien

Ereignis	Fall 1a Zeit [s]	Fall 1b Zeit [s]	Fall 1d Zeit [s]
“Nulltransiente” / Stationäre Bedingungen	-2500 – 0	-2500 – 0	-2500 – 0
Öffnung des Lecks in Schleife 2	1,0	1,0	1,0
RESA	22,8	22,8	22,8
TUSA	22,7	22,7	22,7
Auslaufen der HKMP	22,7	22,7	22,7
Beginn des sekundären Abfahrens	22,2	n/a	n/a
NKV-Signal	39,5	40,0	40,0
DG hochgelaufen	62,7	62,7	62,7
Beginn HD-Einspeisung	62,8	62,8	n/a
Beginn Druckspeichereinspeisung	2156,0	2646,0	2475,0
Beginn der ND-Einspeisung	2955,5	4790,0	10385,0
Ende der Druckspeichereinspeisung	4923,0	5493,0	n/a
Ende der HD-/ND-Einspeisung	4524,4	5491,8	n/a
Ende der flüssigen Leckausströmung Hauptsächlich Dampfausströmung	5190,0 ab \approx 10000,0	6220,0 ab 6410,0	880,0 ab 1000,0
RDB-Füllstand sinkt unter Kernaustritt (RPVMIN3)	6660,0	7285,0	1149,0
Beginn H ₂ -Freisetzung (Zr-Oxidation)	n/a	9740,0	1675,0
Beginn Kernaufheizung (BAT > 400 °C)	n/a	10630,0	1830,0
Auslösen des SAMG-Signals (BAT > 650 °C)	n/a	11392,0	2168,0
Beginn des Absorberschmelzens	n/a	11565,0	2300,0
Erste Freisetzung von Spaltprodukten	n/a	11770,0	2551,0
RDB-Füllstand fällt unter Kerneintritt	n/a	11842,0	2480,0
Gesamtmasse H ₂ > 10 kg	n/a	12109,0	2663,0
Beginn des Brennstoffschmelzens	n/a	12247,0	2755,0
Mehr als 50 % des Kerns geschmolzen	n/a	14530,0	n/a
Verlagerung von Kernmaterial in das LP	n/a	13322,0	6168,0
Beginn der RDB-Wand-Schädigung	n/a	14560,0	10550,0
Wasser im LP vollständig verdampft	n/a	19390,0	10250,0
RDB-Versagen	n/a	26335,0	20470,0

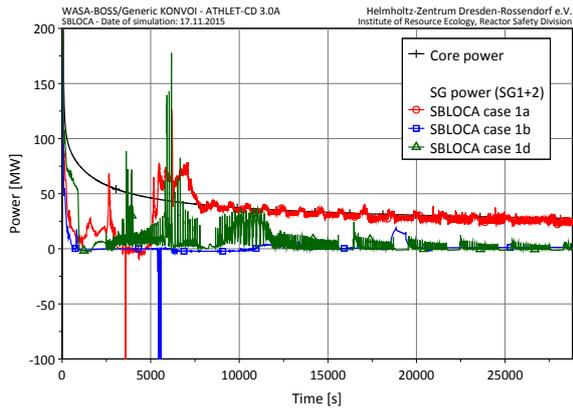


Abb. 5.13: SBLOCA-Simulationen. Kernleistung und DE-Leistung

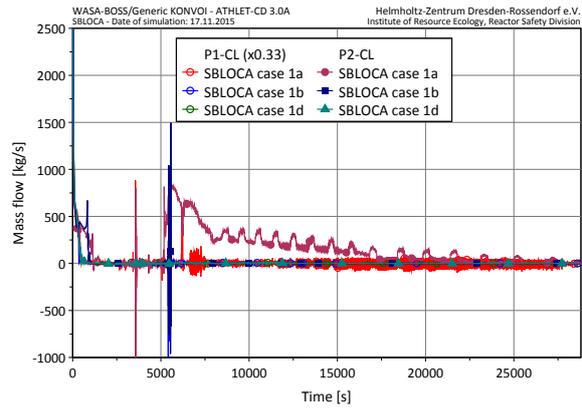


Abb. 5.14: SBLOCA-Simulationen. Massenströme in den kalten Strängen

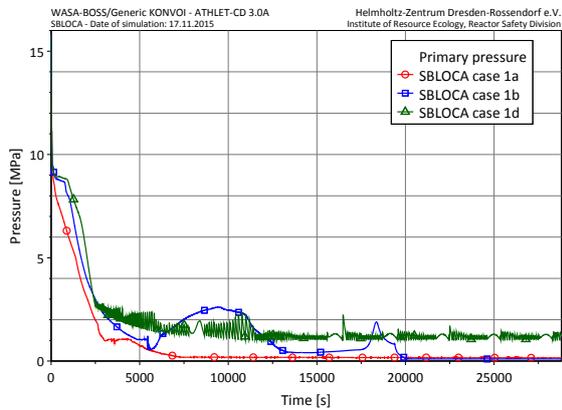


Abb. 5.15: SBLOCA-Simulationen. Primärkreisdruck

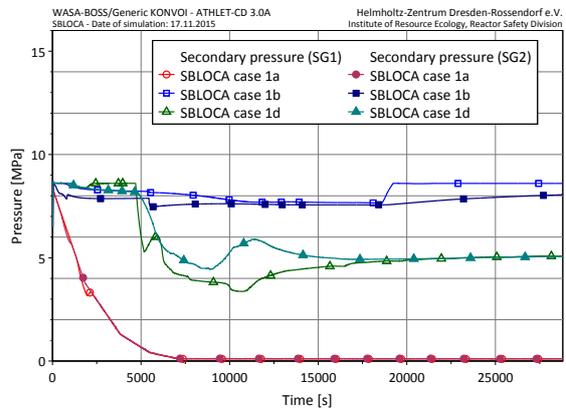


Abb. 5.16: SBLOCA-Simulationen. Sekundärseitige Drücke

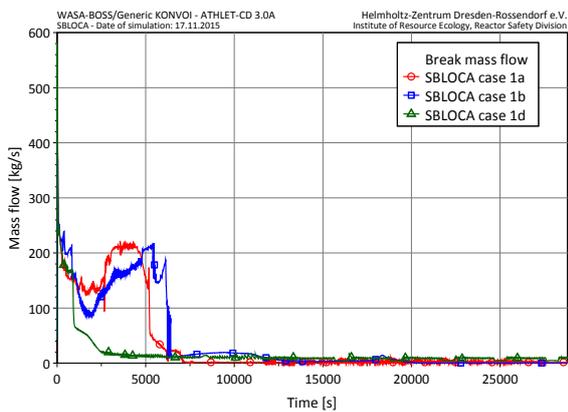


Abb. 5.17: SBLOCA-Simulationen. Leckmassenstrom

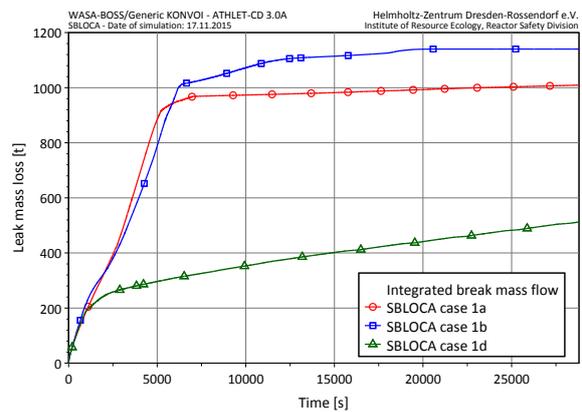


Abb. 5.18: SBLOCA-Simulationen. Kühlmittelmasseverlust durch das Leck

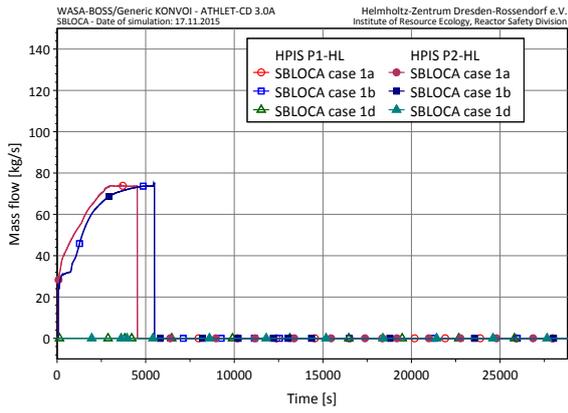


Abb. 5.19: SBLOCA-Simulationen. Massenstrom HD-Einspeisung

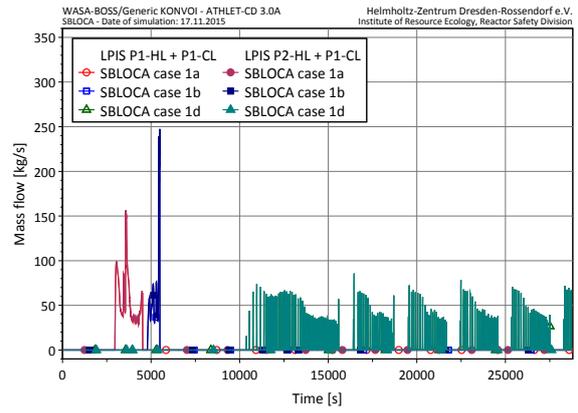


Abb. 5.20: SBLOCA-Simulationen. Massenstrom ND-Einspeisung

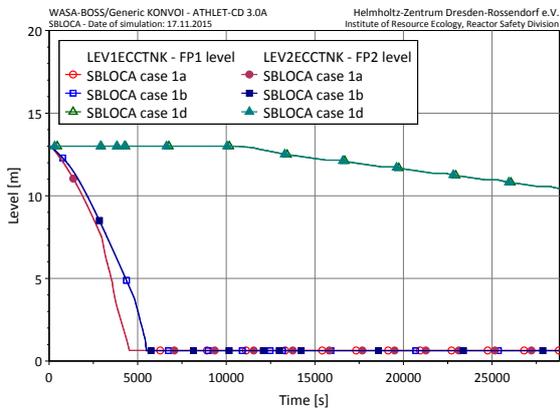


Abb. 5.21: SBLOCA-Simulationen. Flutbeckenfüllstand

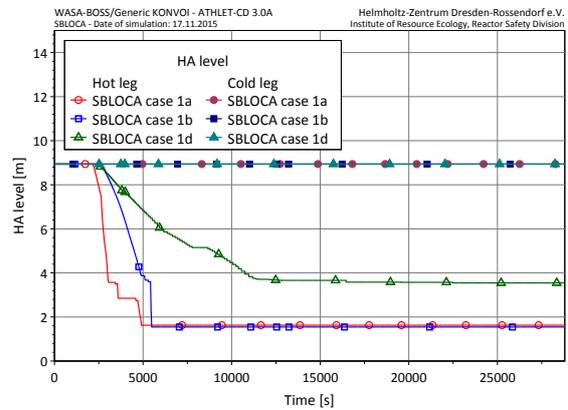


Abb. 5.22: SBLOCA-Simulationen. Druckspeicherfüllstände

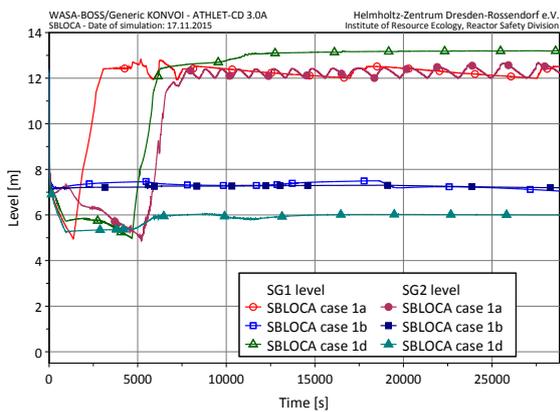


Abb. 5.23: SBLOCA-Simulationen. Dampferzeugerfüllstände

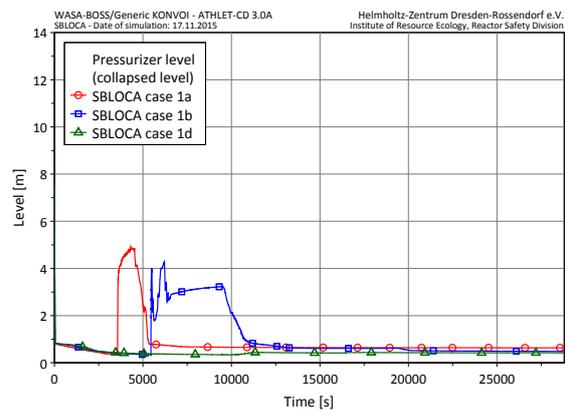


Abb. 5.24: SBLOCA-Simulationen. Füllstand im Druckhalter

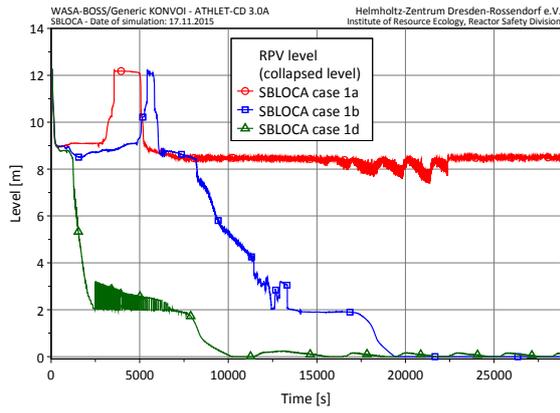


Abb. 5.25: SBLOCA-Simulationen. RDB-Füllstand

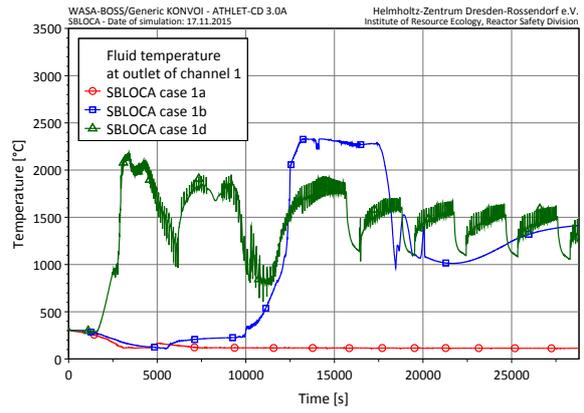


Abb. 5.26: SBLOCA-Simulationen. Kernaustrittstemperatur

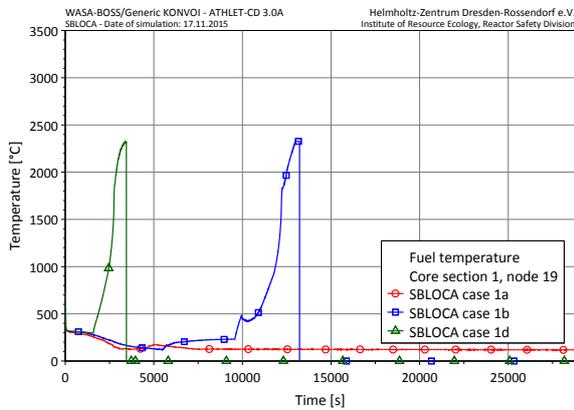


Abb. 5.27: SBLOCA-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der inneren Kernsektion

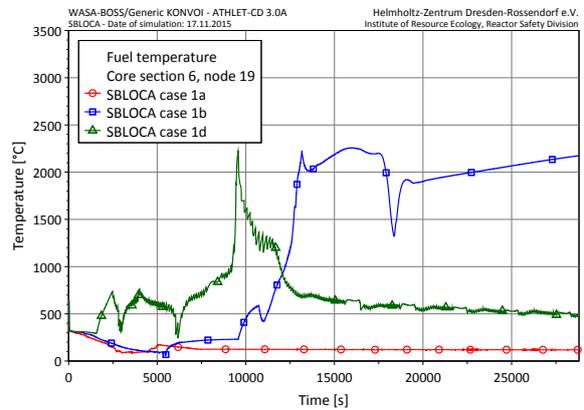


Abb. 5.28: SBLOCA-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der äußeren Kernsektion

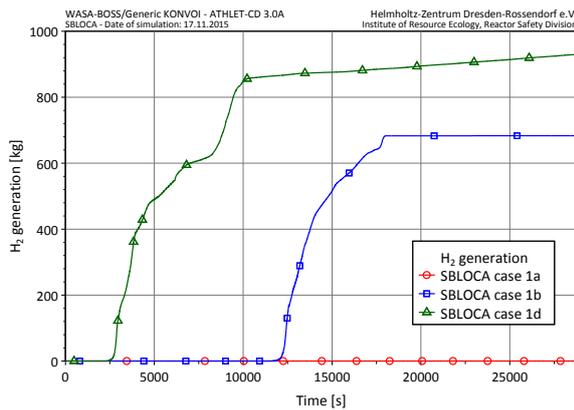


Abb. 5.29: SBLOCA-Simulationen. Akkumulierte Masse an Wasserstoff

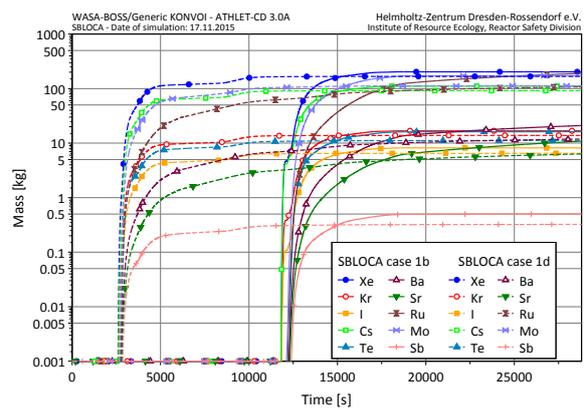


Abb. 5.30: SBLOCA-Simulationen. Freigesetzte Mengen an Spaltprodukten

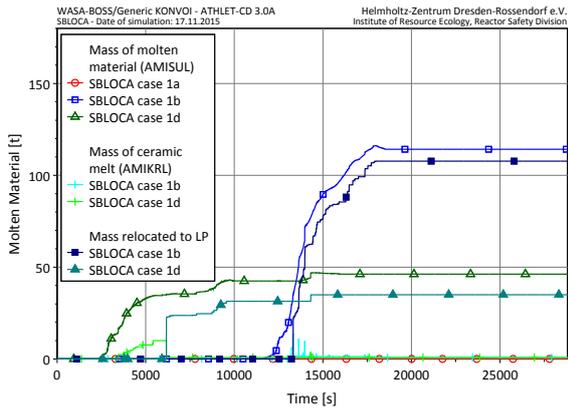


Abb. 5.31: SBLOCA-Simulationen. Masse geschmolzenen Kernmaterials und keramischer Schmelze sowie in das LP verlagerte Masse

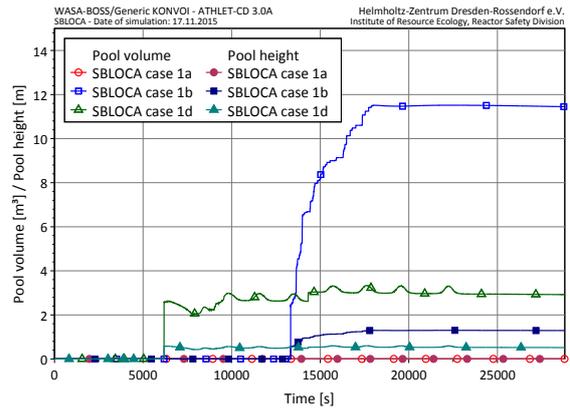


Abb. 5.32: SBLOCA-Simulationen. Volumen und Höhe des Schmelzepools im LP

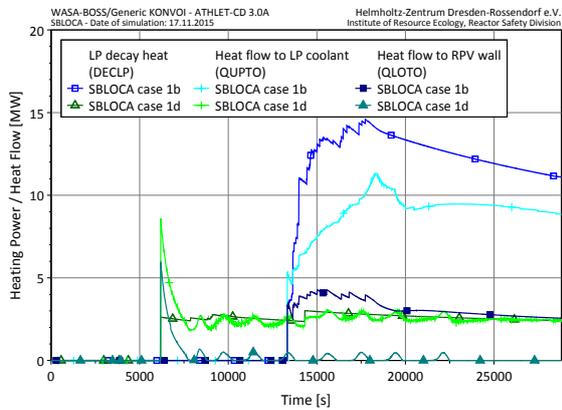


Abb. 5.33: SBLOCA-Simulationen. NZW im unteren Plenum, Wärmeabgabe des Schmelzepools an die Wasserschicht und RDB-Wand

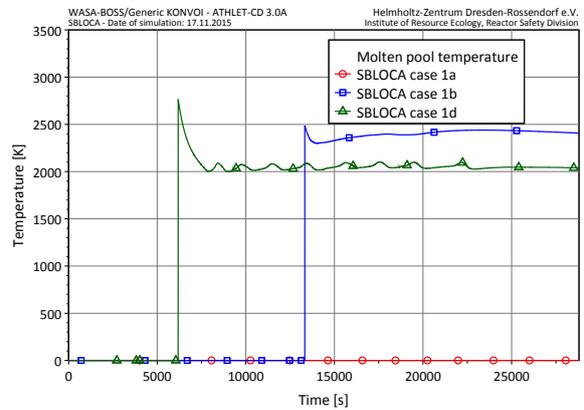


Abb. 5.34: SBLOCA-Simulationen. Temperatur des Schmelzepools

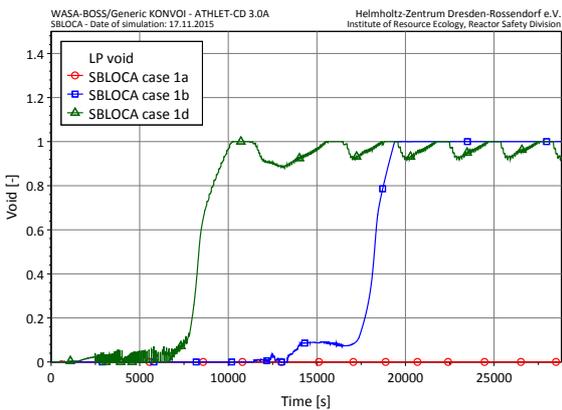


Abb. 5.35: SBLOCA-Simulationen. Dampfgehalt im unteren Plenum

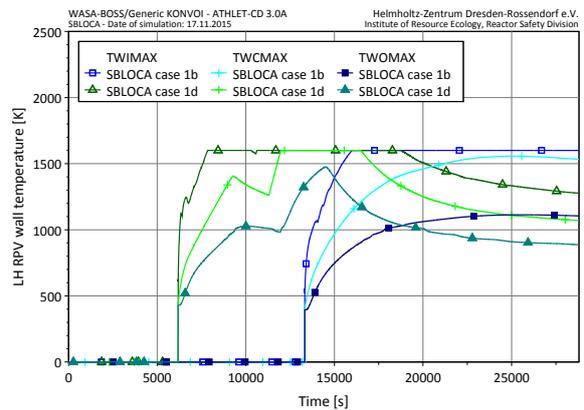


Abb. 5.36: SBLOCA-Simulationen. Maximale RDB-Wandtemperaturen (TWIMAX = innere Oberfläche, TWCMAX = max. Zentraltemperatur, TWOMAX = äußeren Oberfläche)

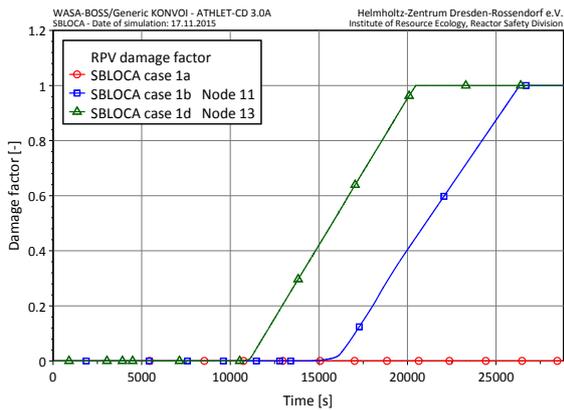


Abb. 5.37: SBLOCA-Simulationen. Schädigungsfaktor der RDB-Wand in dem Node mit frühestem Versagen

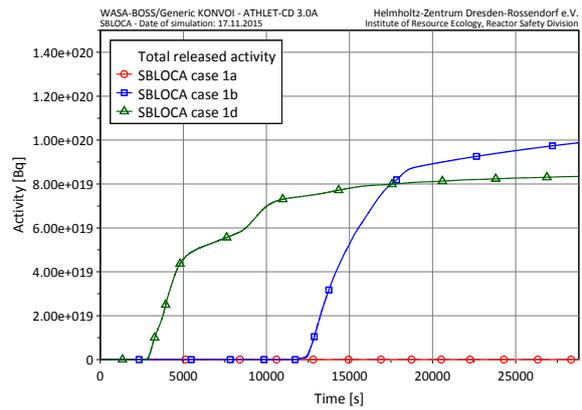


Abb. 5.38: SBLOCA-Simulationen. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität

5.3 Simulationen zu Station-Blackout-Störfällen (SBO)

5.3.1 Definition der Szenarien

Für das Basisszenarium zum Station Blackout wurden folgende Annahmen und Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Auslösendes Ereignis: Totalausfall der Drehstromversorgung (Ausfall der externen und internen Stromversorgung sowie Unverfügbarkeit der Notstrom-Dieselgeneratoren),
- Ausfall aller aktiven Sicherheits- und Notkühlsysteme und der Speisewasserversorgung für die Dampfzeuger,
- Passive Sicherheitssysteme und batterieversorgte Systeme sind verfügbar,
- Druckhalterventile und sekundärseitige Druckbegrenzung bzw. -regelung sind verfügbar.

In einer zweiten Simulation wurde die primärseitige Druckentlastung (PDE) als Notfallmaßnahme angewandt. Auslösekriterium hierbei ist das Erreichen einer Brennelementaustrittstemperatur $BAT > 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Hierbei wurde die Verfügbarkeit einer ausreichenden batteriegestützten Stromversorgung für das Auslösen der PDE angenommen.

Die Simulationen wurden für einen Zeitraum von $8 \frac{1}{2}$ Stunden durchgeführt. Für diesen Zeitraum wird angenommen, dass die sekundärseitige Druckregelung verfügbar ist (Notstromversorgung mit Batterien) und dass die DH-Ventile durch die Operatoren geöffnet werden können, um die Primärkreisdruckentlastung durchzuführen.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Abb. 5.39–5.60 zusammengestellt und werden nachfolgend diskutiert.

5.3.2 Ergebnisse der Simulationen mit ATHLET-CD 3.0A

Die Transiente beginnt bei Nominalbedingungen. Mit Störfalleintritt fallen die Hauptkühlmittelpumpen und die Speisewasserversorgung der Dampferzeuger aus. Durch den Ausfall der Hauptkühlmittelpumpen werden die Reaktorschnellabschaltung und der Turbinenschnellschluss ausgelöst. Die Frischdampf- und Speisewassermassenströme sinken innerhalb weniger Sekunden auf den Wert Null. Nach Auslaufen der Hauptkühlmittelpumpen wird die Nachzerfallsleistung primärseitig durch Naturumlauf an die Dampferzeuger und von dort über die Sekundärseite abgeführt. Mit der schnell sinkenden Reaktor- und Dampferzeugerleistung (Abb. 5.39) fallen auch die Dampferzeugerfüllstände anfangs sehr schnell ab (Abb. 5.41). Vom Signal Frischdampfdruck > 86 bar wird das sekundärseitige Teilabfahren auf 75 bar ausgelöst (Abb. 5.42). Durch die sekundärseitige Abblaseregulierung und wegen der ausgefallenen Speisewasserversorgung sinken die Dampferzeugerfüllstände allmählich ab (Abb. 5.41). Nach Austrocknen der Dampferzeuger (45 min nach Störfallbeginn) bricht die Dampferzeugerleistung zusammen (Abb. 5.39) und dadurch steigt der Primärkreisdruck bis zum Ansprechdruck des Druckhalterabblaseventils (Abb. 5.40). Ein weiterer Druckanstieg wird durch periodisches Ansprechen des Ventils begrenzt (Abb. 5.43). Durch den ansteigenden Füllstand im Druckhalter (Abb. 5.46) strömt zunehmend auch Zweiphasengemisch bzw. Wasser über das Druckhalterabblaseventil in das durch ein Time Dependent Volume modelliertes Containment. Der in der Anlage vorhandene Abblasetank ist aufgrund numerischer Probleme in der hier gezeigten Simulation nicht implementiert. Eine detaillierte Darstellung dazu ist /Jobst et al. 2016c, Anhang B.4/ zu entnehmen. Ebenda wird auch gezeigt, dass der Abblasebehälter für den Verlauf der Transiente unbedeutend ist.

Mit zunehmendem Masseaustrag über das Druckhalterabblaseventil beginnt der Füllstand im Reaktordruckbehälter zu sinken (Abb. 5.47) und es bildet sich zunehmend Dampf im Primärkreis. Wenn der Füllstand im Reaktordruckbehälter unter die Position der Hauptkühlmittelleitungen sinkt, so strömt Dampf auch in die U-Rohre der Dampferzeuger. Durch den zunehmenden Druckverlust in den U-Rohren bricht der Naturumlauf zusammen. Damit wird keine Wärme mehr zur Sekundärseite abgeführt. In der Folge steigt der Primärdruck (Abb. 5.40) soweit an, dass auch das erste Druckhaltersicherheitsventil anspricht (Abb. 5.43). Da die Nachzerfallswärme über die Druckhalterventile allein nicht abgeführt werden kann, steigen die Temperaturen auf der Primärseite an (Abb. 5.48). Durch weitere Füllstandsabsenkung kommt es zur Kernfreilegung und nachfolgender Aufheizung. Bei $t = 1$ h 56 min wird eine BAT von 400 °C erreicht und bereits 10 min später beträgt die BAT > 650 °C, was den Übergang zu einem schweren Störfall kennzeichnet (SAMG-Signal), mit stark ansteigenden Hüllrohr- und Brennstofftemperaturen (Abb. 5.49 und Abb. 5.50). Die Hüllrohroxidation setzt bereits bei 1 h 50 min ein, wobei signifikante Wasserstofffreisetzungen ab etwa 2 h 20 min beobachtet werden. Wenige Minuten später beginnen die

Brennstäbe aufzuschmelzen und es kommt zur Freisetzung von Spaltprodukten (Abb. 5.60).

Etwa 2 h 35 min nach Störfallbeginn liegt eine signifikante Menge an keramischer Schmelze vor (AMIKRL, etwa 10 t), so dass das Kriterium für den Beginn der Materialverlagerung vom Kern in das untere Plenum erfüllt ist (wie in den SBLOCA-Szenarien $AMIKRL > 0$). Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Gesamtmasse an geschmolzenem Kernmaterial (AMISUL) 50 t. Dieser Wert ist deshalb im Eingabedatensatz für den Beginn der Verlagerung (und Start des Moduls AIDA) spezifiziert. Es wird die Bildung eines homogenen Schmelzepools angenommen, der von einer Wasserschicht bedeckt ist. Dieser weist nach der ersten Materialverlagerung eine Höhe von 0,4 m und ein Volumen von 2,2 m³ auf. Das Volumen des Pools wächst durch weitere Materialverlagerung schnell an (Abb. 5.54). Die im Pool freigesetzte NZW beträgt dabei bis zu 17 MW. Der größere Anteil wird dabei über die obere Oberfläche an das im LP verbliebene Wasser abgeführt, jedoch wird ebenfalls ein signifikanter Wärmestrom (etwa 1–3 MW, Abb. 5.55) an die RDB-Wand abgeführt und führt zu deren Aufheizung (Abb. 5.58). Die Belastungen durch den hohen Primärkreisdrucks und den Wärmestrom führen zu einem frühzeitigen Versagen des RDB etwa 3 h 27 min nach Beginn der Transiente (Abb. 5.59).

In einer zweiten Simulation wurde die PDE als Notfallmaßnahme angewandt. Ungefähr 1 h 55 nach Beginn des SBO übersteigt die BAT 400 °C. Durch dieses Auslösekriterium wird eine Druckentlastung des Primärkreises durch das vollständige Öffnen des DH-Abblaseventils und der beiden DH-Sicherheitsventile eingeleitet (Abb. 5.43). Es folgt ein rasches Absinken des Primärkreisdrucks (Abb. 5.40), allerdings ebenfalls mit einem raschen Absinken des RDB-Füllstandes bis zum Brennelementeintritt (Abb. 5.47). Fällt der Primärkreisdruck unter 26 bar, so beginnen die Druckspeicher Kühlmittel in den Primärkreis einzuspeisen. Für die vorliegenden Simulationen wurde dabei angenommen, dass alle 8 Druckspeicher einspeisen (kein Absperren der kaltseitigen Druckspeicher). Der zuvor freigelegte Kern wird wieder vollständig geflutet und damit kann die Kernaufheizung vorerst gestoppt werden (Abb. 5.49–5.50). Nach der vollständigen Entleerung der Druckspeicher führt der Kühlmittelverlust über die DH-Ventile erneut zur Kernfreilegung und Kernaufheizung (zweite oder endgültige Kernaufheizung). Im Vergleich zum Szenario ohne PDE verlängert sich die Zeitspanne bis zum Erreichen einer Hüllrohrtemperatur von 1200 °C um ungefähr 1 h und 35 min. Der Vergleich der beiden Simulationen zeigt damit deutlich den Effekt der PDE zur Begrenzung der Unfallfolgen. Im zweiten Szenario erfolgt der Kernschaden verzögert und bei niedrigem Druck. Die verzögerte Kernaufheizung gibt dem Betriebspersonal einen längeren Zeitraum für die Einleitung zusätzlicher Maßnahmen, wie z. B. die Wiederinbetriebsetzung der Spannungsversorgung für die aktiven Sicherheitseinspeisepumpen bzw. die Not- und Nachkühlpumpen oder für den Anschluss mobiler Einspeisesysteme (z. B. leistungsstarke Feuerlöschpumpen) an das Reaktorkühlsystem. Für das hier diskutierte Szenario wurden jedoch keine zusätzli-

chen Maßnahmen ergriffen. Folglich kommt es etwa 3 h 45 min nach Beginn zum Aufschmelzen von Absorbermaterial, bereits 2 min später zur ersten Freisetzung von Spaltprodukten und weitere 10 min später zum Schmelzen von Brennstäben.

Als Kriterium für den Beginn der Verlagerung von Kernmaterial in das LP wird wiederum eine bestimmte Masse an keramischer Schmelze herangezogen (ATHLET-CD-Parameter AMIKRL > 10 t). In den Simulationen mit PDE wird dieses Kriterium bereits bei einer Gesamtschmelzemasse (AMISUL) von etwa 35 t erreicht. Deshalb ist diese Schmelzemasse im Eingabedatensatz für dieses Szenario zur Initialisierung der Verlagerung und Start des Moduls AIDA gesetzt. ATHLET-CD ermittelt den Beginn der Verlagerung bei etwa 4 h 15 min (1 h 40 min Verzögerung im Vergleich zum Szenario ohne PDE). Nach der Verlagerung dauert es etwa 2 h 30 min bis zur vollständigen Verdampfung des noch im LP befindlichen Kühlmittelinventars oberhalb des Schmelzesees (Abb. 5.57). Das Versagen des RDB wird etwa bei 8 h 5 min berechnet (Verzögerung um etwa 4 ½ h im Vergleich zur Simulation ohne PDE). Die wesentlich längere Zeitspanne zwischen Beginn der RDB-Wandschädigung und dem RDB-Versagen ist auf den wesentlich geringeren Primärkreisdruck zurückzuführen.

Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über während der beiden Szenarien auftretende Ereignisse.

Tabelle 5.4: Wesentliche Ereignisse während der SBO-Szenarien

Ereignis	SBO Zeit [s]	SBO + PDE Zeit [s]
“Nulltransiente” / Stationäre Bedingungen	-2500 – 0	-2500 – 0
Einleitendes Ereignis SBO	1,0	1,0
TUSA	1,0	1,0
Auslaufen der HKMP	1,0	1,0
Drehzahl der HKMP < 94 %	3,0	3,0
RESA	3,7	3,7
Einleiten des sekundärseitigen Teilabfahrens	14,1	14,1
DE vollständig ausgedampft (SG1/SG2)	2740,0/2800,0	2740,0/2800,0
Bersten der Berstscheiben des Abblasebehälters ¹⁰	4122,0	4122,0
RDB-Füllstand sinkt unter Kernaustritt (RPVMIN3)	6171,0	9710,0
Beginn der Wasserstofffreisetzung (Zr-Oxidation)	6695,0	6710,0
Einleitung der PDE	n/a	6930,0
Beginn der Druckspeichereinspeisung	n/a	7509,0
Ende der Druckspeichereinspeisung	n/a	8165,0
Beginn der Kernaufheizung BAT > 400 °C	6930,0	12640,0
Auslösen des SAMG-Signals BAT > 650 °C	7565,0	13290,0
Beginn des Absorbermaterials schmelzens	7870,0	13430,0
Gesamtmasse an freigesetztem H ₂ > 10 kg	8353,0	14040,0
Erste Freisetzung von Spaltprodukten	8810,0	13580,0
Beginn des Brennstabschmelzens	8810,0	14210,0
RDB-Füllstand fällt unter den Kerneintritt (2,05 m)	8850,0	15840,0
Verlagerung von Kernmaterial in das LP	9382,0	15289,3
Mehr als 50 % des Kerns sind geschmolzen	12165,0	19020,0
Beginn der RDB-Wand-Schädigung	10730,0	16750,0
Wasser im LP vollständig verdampft	11570,0	24320,0
RDB-Versagen	12422,0	29196,7

¹⁰ Mittels einer separaten ATHLET-CD-Simulation ermittelt, wobei der Abblasebehälter im Detail modelliert wird; siehe /Jobst et al. 2016c, Anhang B.4/).

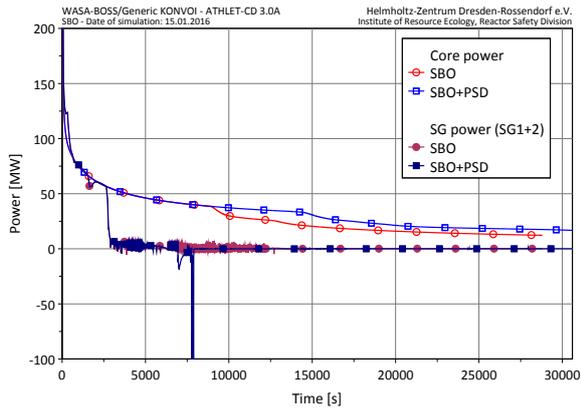


Abb. 5.39: SBO-Simulationen. Kernleistung und DE-Leistung

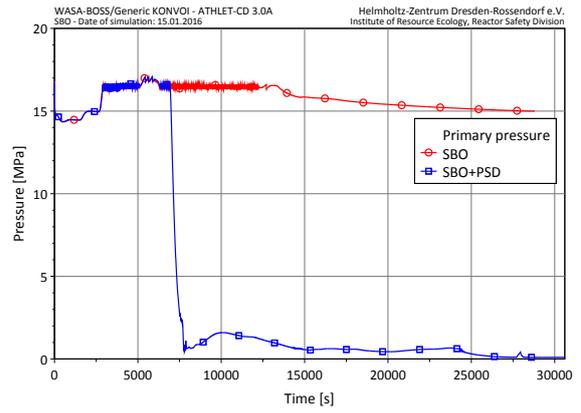


Abb. 5.40: SBO-Simulationen. Primärkreisdruck

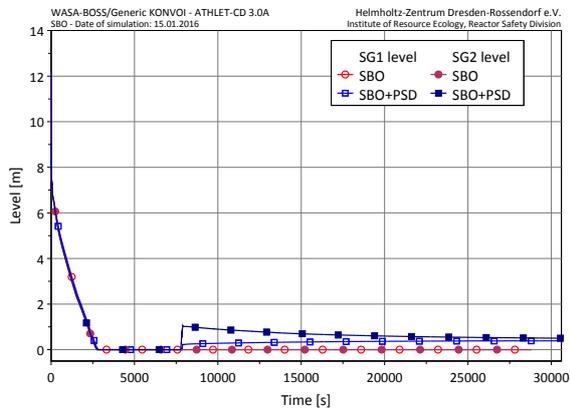


Abb. 5.41: SBO-Simulationen. Dampferzeu-gerfüllstände

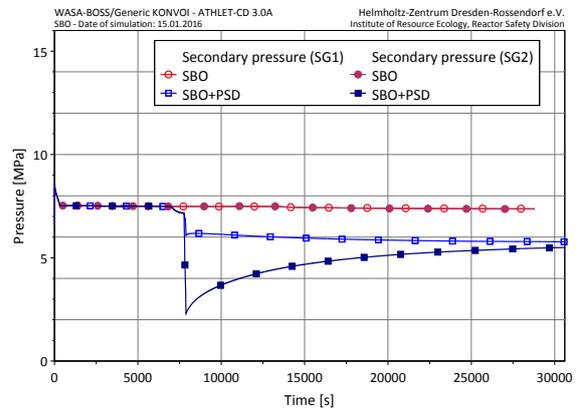


Abb. 5.42: SBO-Simulationen. Sekundärsei-tige Drücke

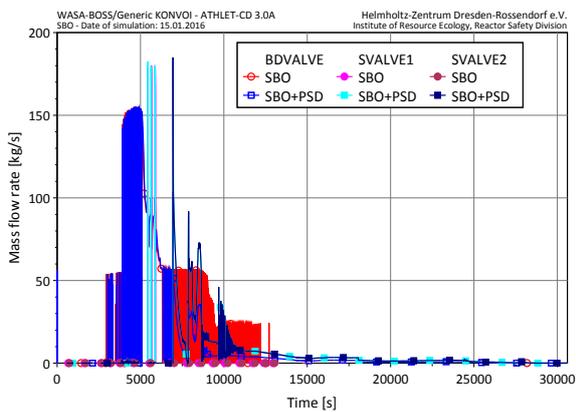


Abb. 5.43: SBO-Simulationen. Massenströme in den DH-Ventilen

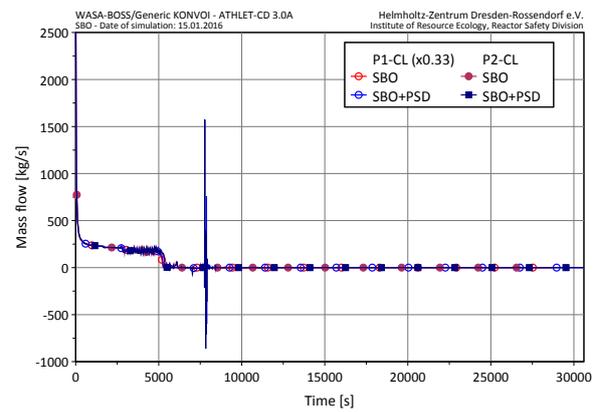


Abb. 5.44: SBO-Simulationen. Massenströme in den kalten Strängen

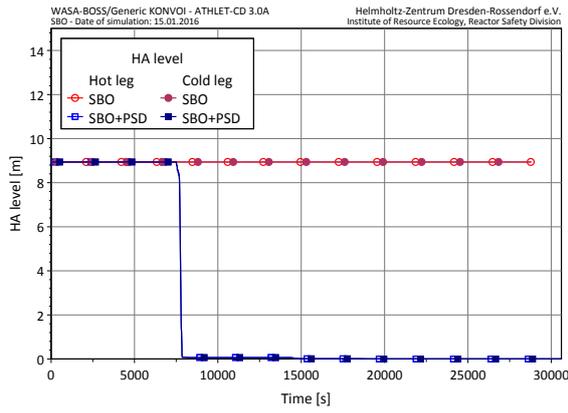


Abb. 5.45: SBO-Simulationen. Druckspeicherfüllstände

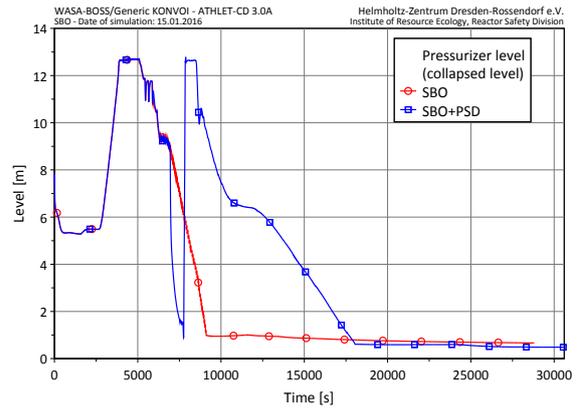


Abb. 5.46: SBO-Simulationen. Füllstand im Druckhalter

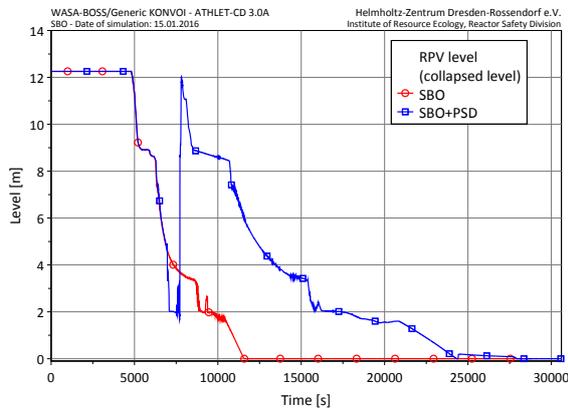


Abb. 5.47: SBO-Simulationen. RDB-Füllstand

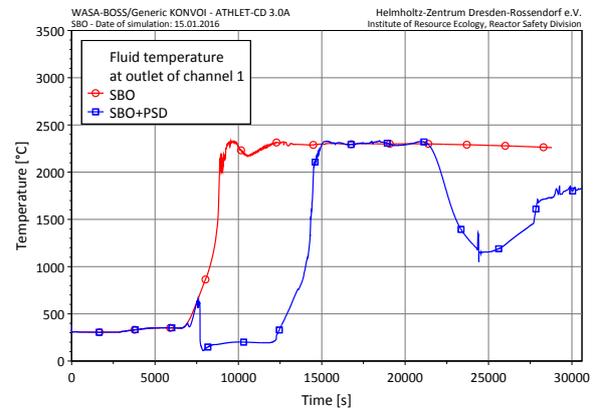


Abb. 5.48: SBO-Simulationen. Kernaustrittstemperatur

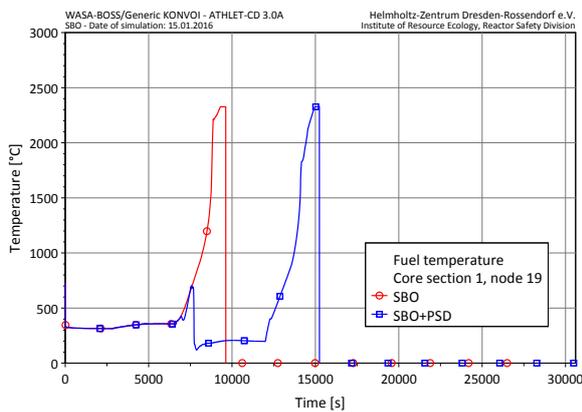


Abb. 5.49: SBO-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der inneren Kernsektion

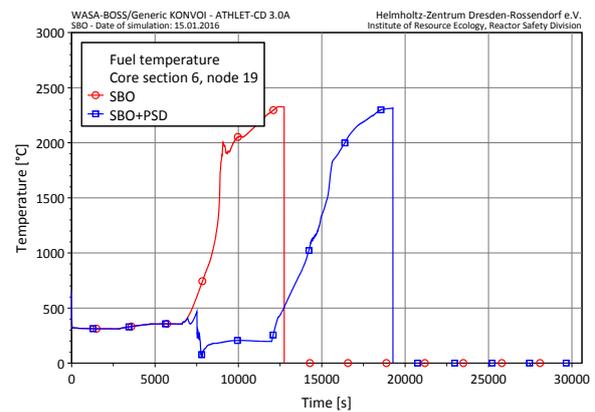


Abb. 5.50: SBO-Simulationen. Brennstofftemperatur im oberen Bereich der äußeren Kernsektion

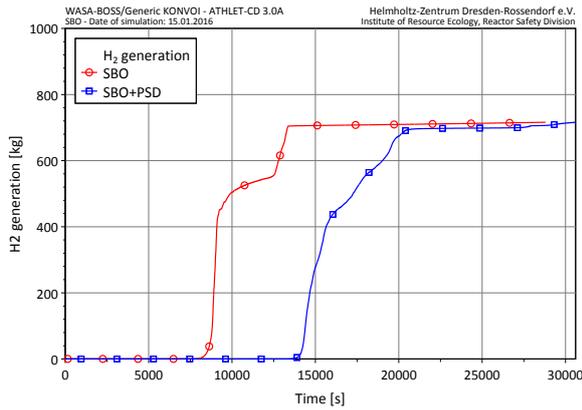


Abb. 5.51: SBO-Simulationen. Akkumulierte Masse an Wasserstoff

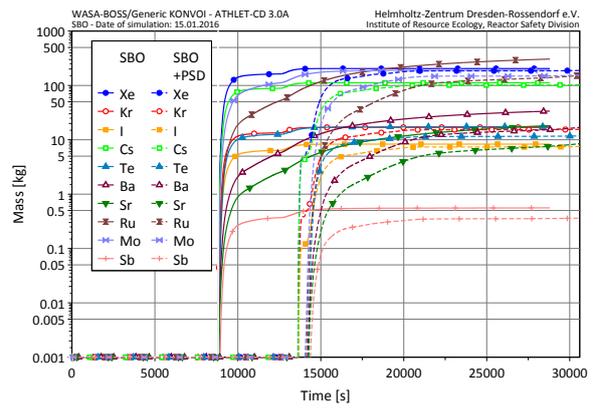


Abb. 5.52: SBO-Simulationen. Freigesetzte Mengen an Spaltprodukten

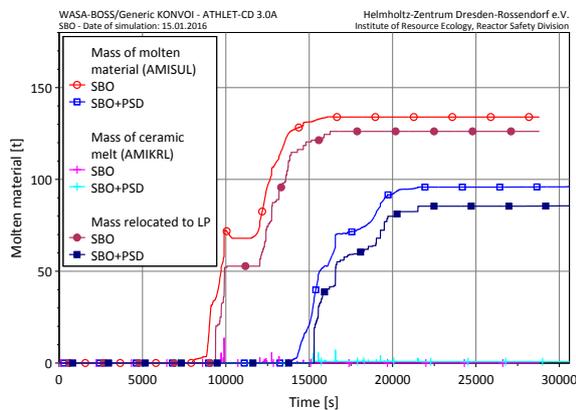


Abb. 5.53: SBO-Simulationen. Masse geschmolzenen Kernmaterials und keramischer Schmelze sowie in das LP verlagerte Masse

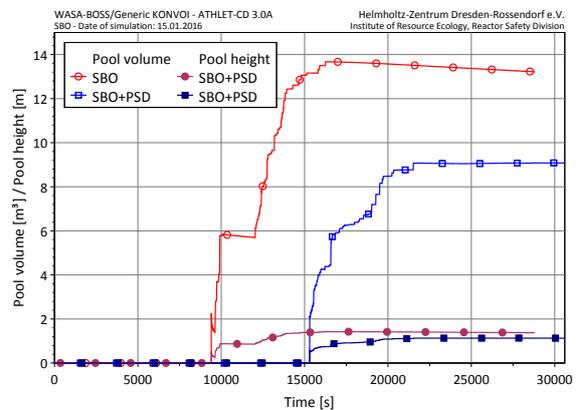


Abb. 5.54: SBO-Simulationen. Volumen und Höhe des Schmelzepools im LP

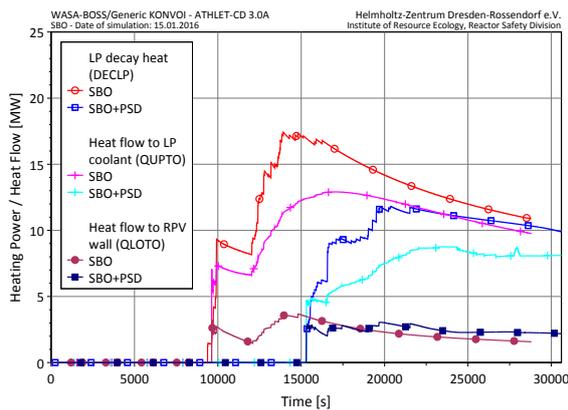


Abb. 5.55: SBO-Simulationen. NZW im unteren Plenum, Wärmeabgabe des Schmelzepools an die Wasserschicht und RDB-Wand

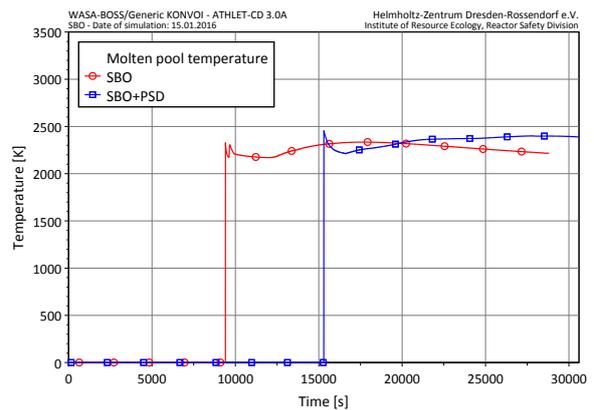


Abb. 5.56: SBO-Simulationen. Temperatur des Schmelzepools

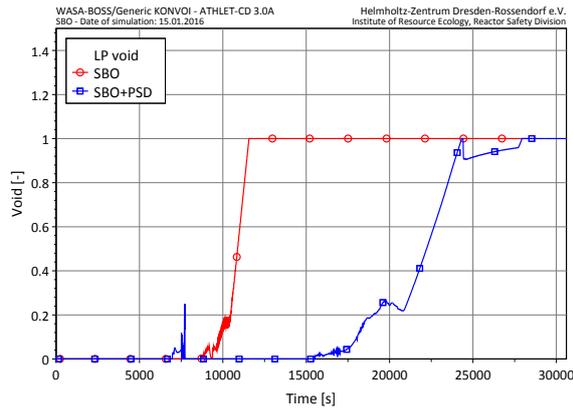


Abb. 5.57: SBO-Simulationen. Dampfgehalt im unteren Plenum

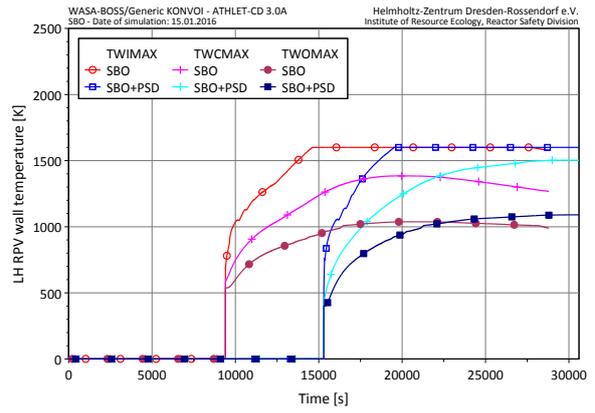


Abb. 5.58: SBO-Simulationen. Maximale RDB-Wandtemperaturen (TWIMAX = innere Oberfläche, TWCMAX = max. Zentraltemperatur, TWOMAX = äußeren Oberfläche)

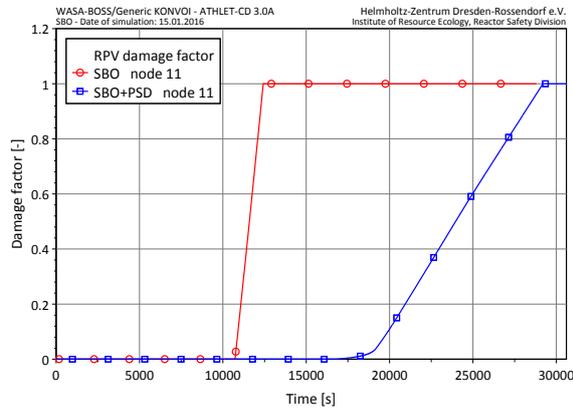


Abb. 5.59: SBO-Simulationen. Schädigungsfaktor der RDB-Wand in dem Node mit frühestem Versagen

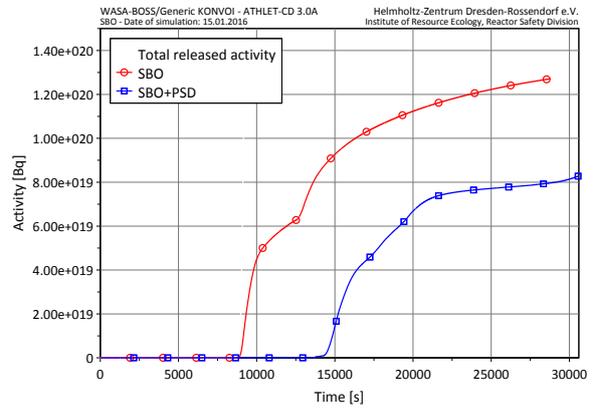


Abb. 5.60: SBO-Simulationen. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität

6. Unsicherheits- und Sensitivitätsstudie für die Frühphase eines SBO-Szenarios

Die frühe Phase des in Abschnitt 5.3 beschriebenen SBO-Szenarios mit Primärkreisdruckentlastung wurde mittels statistischer Methoden detaillierter untersucht, um Aussagen über die Unsicherheiten im Verlauf der Transiente zu gewinnen. Die Analysen beschränkten sich dabei auf den Zeitbereich vor Auftreten einer signifikanten Kernschmelze (Programmabbruchkriterium Schmelzemasse = 10 kg). Die Simulationen wurden hierfür mit der Programmversion ATHLET-CD 3.0B_WASA_BOSS durchgeführt.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Unsicherheits- und Sensitivitätsstudie wird in /Kozmenkov et al. 2017/ gegeben. Nachfolgend werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Für die Studie wurden 30 Modellparameter mit potentielltem Einfluss auf die untersuchten Unsicherheiten der Simulationsergebnisse identifiziert und quantifiziert. Für die Transiente wurden zunächst die zeitlichen Unsicherheiten ausgewählter Ereignisse ermittelt. Dazu wurden insgesamt 181 ATHLET-CD-Durchläufe mit jeweils einem zufällig generierten Vektor unsicherer Eingabeparameter gerechnet und aus den Rechenergebnissen die 95. Perzentile der Ereigniszeiten ermittelt. Eine durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte, dass 20 der 30 variierten Parameter einen statistisch signifikanten Beitrag zu den Unsicherheiten der Simulationsergebnisse lieferten, wobei die Unsicherheit in der Nachzerfallswärmeleistung den dominierenden Beitrag darstellte. Es wurden mehrere lineare Regressionsfunktionen ermittelt, um auf Basis der beobachteten Zeitpunkte bereits eingetretener Ereignisse das Eintreten zukünftiger Ereignisse (mit dem geforderten Konfidenzniveau) vorherzusagen. Durch die Beobachtung eines Ereignisses kollabiert das für dieses Ereignis vorausberechnete 95. Perzentil zu einem einzelnen, festen (d. h. beobachteten) Zeitpunkt, und führt in der Konsequenz zu einer Reduktion der Unsicherheit in der Vorhersage nachfolgender (zukünftiger) Ereignisse. Die ermittelten Vorhersagezeitintervalle wurden erfolgreich in einer zweiten, unabhängigen Serie von Simulationen bestätigt.

Für das untersuchte SBO-Szenario mit PDE bei BAT = 400 °C wurde für den Beginn der Kernschmelze ein Unsicherheitsintervall (mit 95%iger Abdeckung und 95%iger Konfidenz) von etwa 1 h ermittelt (Beginn der Kernschmelze bei $t = 3 \text{ h } 54 \text{ min } \pm 30 \text{ min}^{11}$).

Für die Vorbereitung und Aktivierung von Notfallmaßnahmen werden anlagenspezifische Kriterien angewandt (siehe Kapitel 8). Die in der Unsicherheits- und Sensitivi-

¹¹ Der Referenzfall mit Kernschmelze bei 3 h 54 min weist dabei eine geringe Abweichung von 10 min gegenüber dem in Abschnitt 5.3 diskutierten Szenario auf. Diese Abweichungen können unter anderem auf die unterschiedlichen verwendeten Programmversionen zurückgeführt werden.

tätsstudie dargestellte Methodik für die Analyse wesentlicher Ereignisse sowie der Zeiten zur Einleitung von Notfallmaßnahmen und die Möglichkeit der genaueren Vorhersage einzelner Ereignisse auf Basis zuvor beobachteter Ereignisse können dabei helfen, die Unsicherheiten in den Karenzzeiten für das Betriebspersonal zu reduzieren.

Die erarbeitete Methodik sollte zukünftig für weitere mögliche Störfallszenarien sowie ebenfalls für die statistische Analyse der Wirksamkeit der in Kapitel 8 gezeigten weiteren Störfallmaßnahmen (z. B. Einspeisung durch mobile Pumpensysteme) angewandt werden. Hervorzuheben ist dabei jedoch, dass sowohl die Auswahl der unsicheren Eingabeparameter als auch der wesentlichen Ereignisse stark vom zu untersuchenden Störfallszenario abhängen.

7. Code-zu-Code-Vergleich zwischen ATHLET-CD und MELCOR

7.1 Einleitung

Die Aussagegenauigkeit von mit Computersimulationen generierten Ergebnissen basiert sehr stark auf einer umfangreichen Verifikation und Validierung der verwendeten Rechenprogramme. Die Qualität der Rechenergebnisse hängt dabei von vielen Faktoren ab, wie die verwendete Nodalisierung (Unterteilung einer komplexen Anlage in kleine Volumina), die verwendeten Modelle zur Beschreibung der einzelnen Effekte, Anfangs- und Randbedingungen. Deshalb werden die in der Reaktorsicherheitsanalyse eingesetzten Programmcodes umfangreich anhand von experimentellen Daten validiert (Code-zu-Experiment-Validierung). Des Weiteren besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Ergebnisse verschiedener Rechenprogramme miteinander zu vergleichen, um Aussagen über die Genauigkeit der einzelnen Programme abzuleiten (Code-zu-Code-Vergleich).

Innerhalb des WASA-BOSS-Verbundvorhabens wurde von den beiden Partnern HZDR und KIT-IKET die Durchführung eines solchen Code-zu-Code-Vergleiches für ein ausgewähltes Störfallszenario vereinbart. Der Vergleich erfolgte dabei zwischen ATHLET-CD und dem Störfallcode MELCOR. HZDR hat hierfür dem KIT eine umfangreiche Beschreibung des generischen KONVOI-ATHLET-CD-Modells bereitgestellt /Jobst, Tusheva 2015/, die detaillierte Erläuterungen zu den verwendeten Teilmodellen, den verwendeten Modellparametern, sowie zu der ausgewählten Transiente enthält. Das daraus von KIT entwickelte MELCOR-Modell wird kurz in Abschnitt 7.2 dargestellt. Die MELCOR-Simulation wurde ebenfalls von KIT gerechnet. Der Vergleich mit den von HZDR erzielten ATHLET-CD-Ergebnissen ist in Abschnitt 7.3 zusammengestellt.

Die für den Vergleich durchgeführten Arbeiten sind dabei als zusätzliche, nicht im ursprünglichen Projektplan definierte Arbeiten anzusehen, die jedoch für das Verbundvorhaben einen Mehrwert erbracht haben. Die Bedeutung dieser Arbeiten liegt darin, dass hierbei ein identisches Störfallszenario mit zwei verschiedenen Störfallcodes gerechnet und direkt miteinander verglichen werden konnte. Es trägt damit direkt zu einer besseren Bewertungsmöglichkeit der beiden Codes bei.

7.2 Kurzbeschreibung des MELCOR-Modells

Das MELCOR-Modell ist ähnlich dem ATHLET-CD-Modell ein 2-Schleifenmodell: mit einer Einfachschleife, welche über die Druckhalteraussgleichsleitung mit dem Druckhalter verbunden ist, sowie einer Dreifachschleife, welche die restlichen drei Schleifen der realen Anlage repräsentiert. Abb. 7.1 zeigt ein Nodalisierungsschema des Modells¹². Alle für die Simulation des SBLOCA-Szenarios wesentlichen Komponen-

¹² Das Nodalisierungsschema zeigt nur den RDB sowie die Einfachschleife. Die Dreifachschleife ist identisch zur Einfachschleife, bis auf den anderen Multiplikator, den Druckhalter und das Leck.

ten und Anlagensysteme sind im Modell enthalten (Details siehe /Jobst et al. 2016c, S. 54/). Im Vergleich zum ATHLET-CD-Modell wurde in MELCOR ein Nodalierungsansatz mit weniger (größeren) Kontrollvolumen gewählt. Beispielsweise wird in MELCOR die Thermohydraulik des Kerns durch ein einzelnes CV modelliert, wohingegen im ATHLET-CD-Modell der Kern durch 6 parallele thermohydraulische Kanäle mit jeweils 22 CV pro Kanal aufgebaut ist. Ähnlich zum ATHLET-CD-Modell ist das Leck im kalten Strang der Einfachschleife zwischen der HKMP und dem RDB angeordnet.

Für den Vergleich wurde das SBLOCA-Szenario ohne sekundärseitiges Abfahren und mit HD-Sicherheitseinspeisung (SBLOCA Fall 1b, Definition des Szenarios siehe Abschnitt 5.2.1) ausgewählt. Mehrere Iterationsschritte waren notwendig um hinsichtlich Anfangs- und Randbedingungen eine Übereinstimmung zwischen beiden Modellen herzustellen.

Die Nachzerfallswärme wurde aus einer ATHLET-CD-Simulation extrahiert und als tabellarische Werte in MELCOR implementiert. Für die Analysen kam die MELCOR-Programmversion 1.8.6 zum Einsatz.

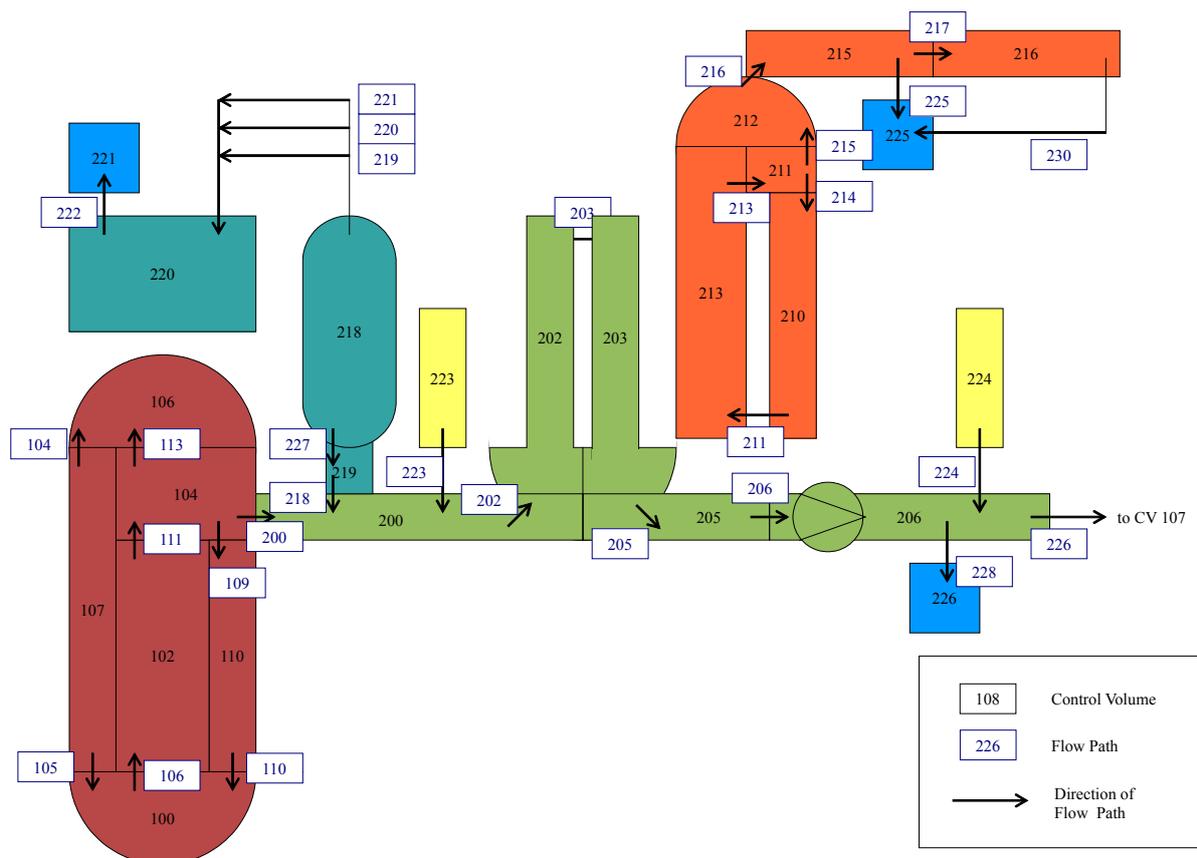


Abb. 7.1: Nodalisierungsschema des generischen KONVOI-MELCOR-Modells /Jobst et al. 2016c/.

7.3 Ergebnisse des Code-zu-Code-Vergleichs

Der zeitliche Verlauf der wichtigsten Anlagenparameter ist in den Abbildungen 7.2–7.13 dargestellt. Für die mit beiden Programmcodes gerechnete Transiente ist der Verlauf der NZW bis zum Beginn der Spaltproduktfreisetzung identisch. Die Freisetzung der hoch-volatilen Spaltprodukte wie Xe oder Cs beginnt in der ATHLET-CD-Simulation bei 3 h 15 min und führt wegen des Abtransports dieser Spaltprodukte nachfolgend zu einer reduzierten Wärmefreisetzung innerhalb des Kerns (rote Kurve, Abb. 7.2). Der Prozess der Spaltproduktfreisetzung wurde jedoch in MELCOR nicht simuliert. Deshalb verbleibt die NZW auf einem höheren Niveau, welches durch die tabellarischen Werte im Eingabedatensatz vorgegeben ist (blaue Kurve, Abb. 7.2). Abb. 7.2 zeigt zudem, dass ab etwa 10 min nach Störfallbeginn über die Dampferzeuger nahezu keine Leistung mehr abgeführt wird (ähnlich für beide Rechenprogramme).

Für die Leckmassenstromrate wurden deutliche Unterschiede zwischen beiden Codes gefunden (Abb. 7.4 und Abb. 7.5). Der von MELCOR berechnete maximale Leckmassenstrom direkt nach Öffnung des Lecks ist ungefähr 33 % geringer als der von ATHLET-CD berechnete Wert. Dies führt in der MELCOR-Simulation während der ersten Phase der Transiente zu einem langsameren Absinken des Primärkreisdrucks und damit auch zu einer verzögerten Reaktorschnellabschaltung, sobald $p_{\text{primär}} < 132 \text{ bar}$ (Abb. 7.3). In beiden Simulationen werden 2 Stränge des HD-Sicherheitseinspeisesystems aktiviert und zeigen einen ähnlichen Verlauf der Einspeisemassenstromrate (Abb. 7.6). Ab etwa 800 s nach Beginn zeigt die MELCOR-Simulation ein schnelleres Absinken des Primärkreisdrucks, was zu einer früheren Einspeisung durch die heißseitigen Druckspeicher führt, die jedoch ihr Kühlmittelinventar nur partiell einspeisen (Abb. 7.9). In der ATHLET-CD-Simulation speisen die Druckspeicher innerhalb von 45 min ihr gesamtes Inventar ein und es erfolgt eine Trennung vom Primärkreis sobald der Füllstand unterhalb von 1,65 m sinkt (zur Vermeidung der Einspeisung von Stickstoff). Die kaltseitigen Druckspeicher werden bereits frühzeitig (500 s nach Anstehen des NKV-Signals) vom Primärkreis getrennt und speisen deshalb nicht ein. Hervorzuheben ist das unterschiedliche Verhalten der ND-Einspeisung: In der ATHLET-CD-Simulation fällt der Primärkreisdruck $p_{\text{primär}} < 11 \text{ bar}$, so dass die ND-Einspeisesysteme einspeisen können. In der MELCOR-Simulation fällt der Primärdruck dagegen weniger stark ab und die ND-Pumpen können nicht einspeisen. Das Leerlaufen der Flutbecken (Flutbeckenfüllstand niedrig) wird in der ATHLET-CD-Simulation etwas eher erreicht (bei 1 h 32 min in der ATHLET-CD-Simulation gegenüber 1 h 38 min in der MELCOR-Simulation). Für beide Simulationen wird ein Versagen der Sumpfeinspeisung angenommen, so dass ab diesem Zeitpunkt keine weitere Einspeisung durch ein aktives System erfolgt. Im Gegensatz zu ATHLET-CD wird von MELCOR vorhergesagt, dass die Druckspeicher zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig entleert sind und deshalb im weiteren

Verlauf der Transiente weiteres Kühlmittel einspeisen und damit die Kernaufheizung verzögern können (Abb. 7.9).

Von beiden Codes wurden ähnliche Zeiten bis zum Beginn der Kernaufheizung ermittelt (Abb. 7.11). So übersteigt die von ATHLET-CD berechnete Hüllrohrtemperatur den Wert 1200 °C (Kriterium für Hüllrohrversagen) nur etwa 6 min früher als in der MELCOR-Simulation. Der Beginn der Hüllrohroxidation sowie die Gesamtmasse an freigesetztem Wasserstoff sind nahezu identisch (10 kg H₂ bei ungefähr 3 h 20 min, Gesamtmasse H₂ nach 8 h beträgt in beiden Simulation etwa 680 kg).

Der zeitliche Verlauf der Masse an geschmolzenem Kernmaterial beginnt ebenfalls sehr ähnlich (Abb. 7.13), jedoch werden verschiedene Annahmen bezüglich des Verlaufs der Kernzerstörungsprozesse sowie der Verlagerung in das untere Plenum (LP) zugrunde gelegt:

- ATHLET-CD: Die Verlagerung von Kernmaterial in das LP beginnt, sobald die Schmelzemasse 35 t übersteigt (Vorliegen keramischer Schmelze). Die Aufheizung und das Versagen der unteren Kerngitterplatte werden nicht modelliert.
- MELCOR: Sobald eine geringe Menge geschmolzenen Kernmaterials in die unteren Bereiche des Kerns verlagert wird, wird ein kontinuierlicher Prozess der Verlagerung in das untere Plenum aktiviert. Das Kollabieren der Kerntragstrukturen wird modelliert, sobald diese 1200 °C übersteigen, gefolgt von einer vollständigen Verlagerung des Kerns in das untere Plenum.

Der Beginn der Verlagerung von Kernmaterial wird von beiden Programmcodes ähnlich bestimmt (ATHLET-CD erreicht das Kriterium für die erste Verlagerung 2 Minuten später als MELCOR), jedoch unterscheiden sich die dabei verlagerten Massen signifikant. MELCOR sagt für die beginnende Verlagerung nur geringe Massen voraus (nur 2 kg innerhalb der ersten 10 min), wohingegen ATHLET-CD für die initiale Verlagerung mehr als 20 t ermittelt. In ATHLET-CD wird nahezu der gesamte Kern innerhalb von 1 h 20 min verlagert, während in MELCOR bis zum Versagen der Kerntragstrukturen (bei 3 h 40 min) weniger als 15 t in das LP verlagert werden (etwa 10 % des gesamten Kerninventars).

Der für die ausgewählte SBLOCA-Transiente durchgeführte Vergleich der wichtigsten Anlagenparameter zeigte zwischen beiden Programmcodes ATHLET-CD und MELCOR im Allgemeinen eine qualitative Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Unterschiede zwischen den Programmcodes sind deutlicher für die Spätphase des Störfallszenarios, insbesondere nach Verlagerung von Schmelze in das untere Plenum. Weitere Arbeiten sind notwendig, um diese Unterschiede tiefergehend zu untersuchen und außerdem umfassendere Vergleiche beider Modelle auch für andere Störfallszenarien durchzuführen.

Tabelle 7.1: Vergleich zwischen ATHLET-CD 3.0A und MELCOR 1.8.6 für ein ausgewähltes SBLOCA-Szenario (Fall 1b). Zusammenstellung der wesentlichen Ereignisse

Ereignis	ATHLET-CD Zeit [s]	MELCOR Zeit [s]
“Nulltransiente” / Stationäre Bedingungen	-2500 – 0	-500 – 0
Öffnung des Lecks in Schleife 2	1,0	0,0
RESA	22,8	47,1
TUSA	22,7	47,1
Auslaufen der HKMP	22,7	56,7
NKV-Signal	40,0	56,7
DG hochgelaufen	62,7	Nicht modelliert
Beginn HD-Einspeisung	62,8	87,5
Beginn Druckspeichereinspeisung	2646,0	1950,0
Beginn der ND-Einspeisung	4790,0	n/a
Ende der Druckspeichereinspeisung	5493,0	17900,0
Ende der HD-/ND-Einspeisung	5491,8	5900,0
Ende der flüssigen Leckausströmung Hauptsächlich Dampfausströmung	6220,0 Ab 6410,0	7100,0 10600,0
RDB-Füllstand sinkt unter Kernaustritt (RPVMIN3)	7285,0	7050,0
Beginn H ₂ -Freisetzung (Zr-Oxidation)	9740,0	9700,0
Beginn der Kernaufheizung (BAT > 400 °C)	10630,0	9600,0
Auslösen des SAMG-Signals (BAT > 650 °C)	11392,0	10300,0
Beginn des Absorberschmelzens	11565,0	11700,0
Erste Freisetzung von Spaltprodukten	11770,0	Nicht modelliert
RDB-Füllstand fällt unter Kerneintritt	11842,0	14000,0
Hüllrohrtemperatur > 1200 °C	12020,0	12320,0
Gesamtmasse H ₂ > 10 kg	12109,0	12200,0
Beginn des Brennstoffschmelzens	12247,0	12300,0
Mehr als 50 % des Kerns geschmolzen	14320,0	16800,0
Verlagerung von Kernmaterial in das LP	13322,0	13200,0
Versagen der Kerngitterplatte	Nicht modelliert	26550,0
Beginn der RDB-Wand-Schädigung	14560,0	Nicht modelliert
Wasser im LP vollständig verdampft	19390,0	27500,0
RDB-Versagen	26335,0	32413,0

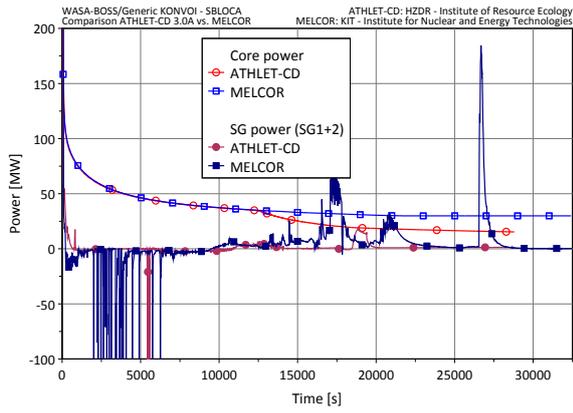


Abb. 7.2: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Kernleistung und DE-Leistung

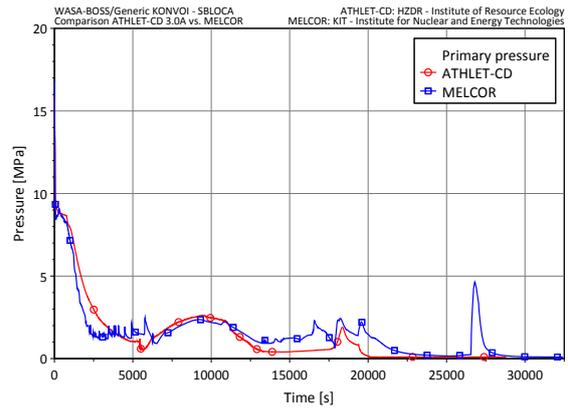


Abb. 7.3: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Primärkreisdruck

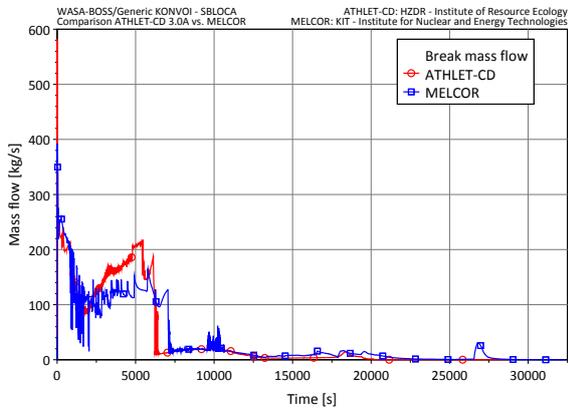


Abb. 7.4: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Leckmassenstrom

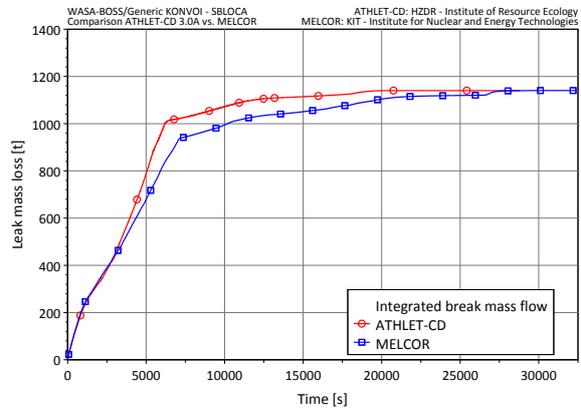


Abb. 7.5: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Integral des Leckmassenstroms (Gesamtmassenverlust)

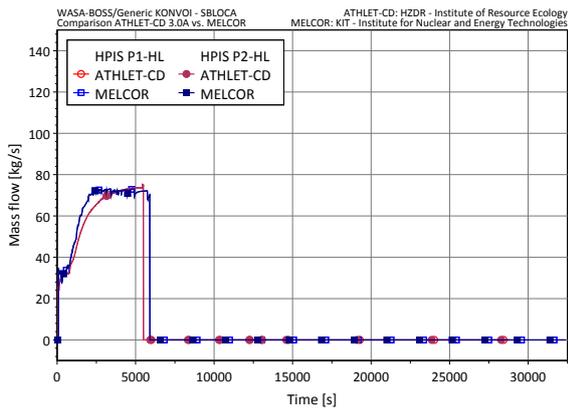


Abb. 7.6: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Massenstrom der HD-Sicherheitseinspeisung

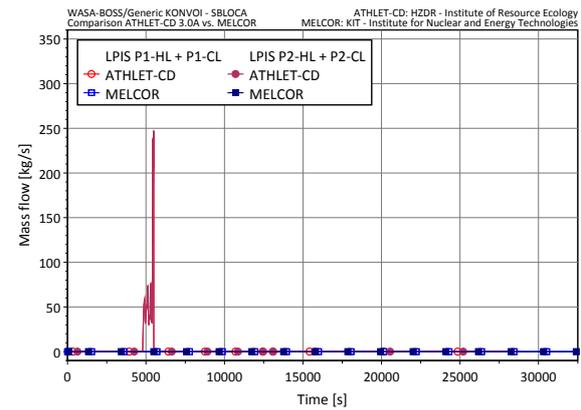


Abb. 7.7: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Einspeisemassenstrom der ND-Not- und Nachkühlpumpen

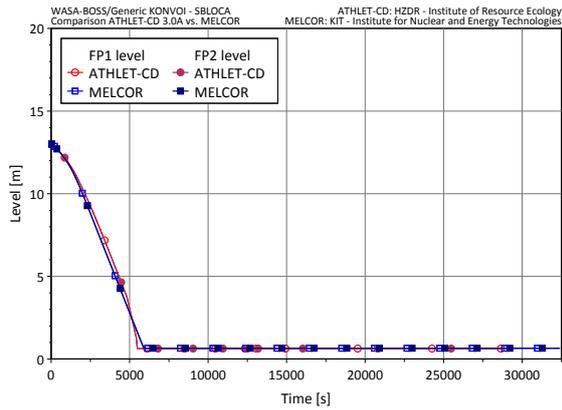


Abb. 7.8: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Flutbeckenfüllstand

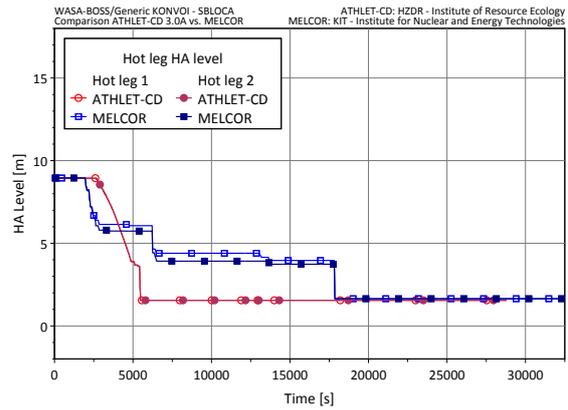


Abb. 7.9: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Füllstand der heißseitigen Druckspeicher

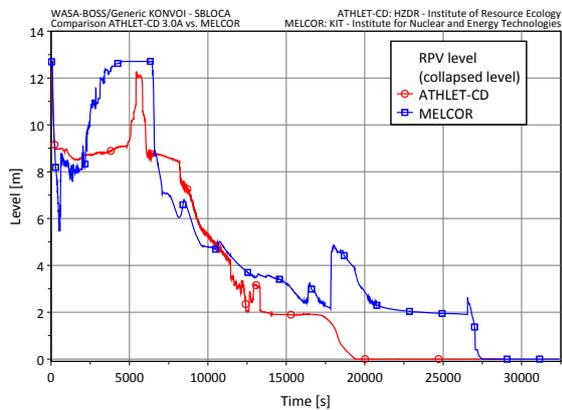


Abb. 7.10: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. RDB-Füllstand

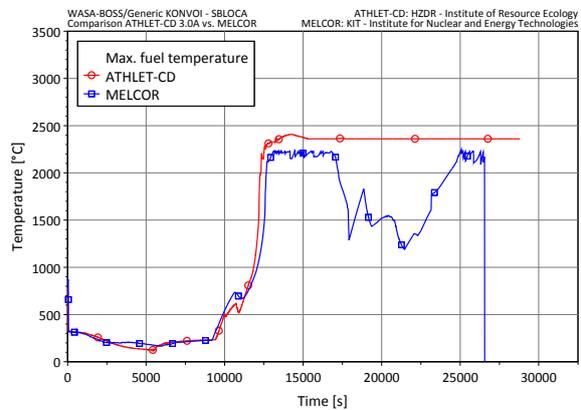


Abb. 7.11: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Maximale Brennstofftemperatur im Kern

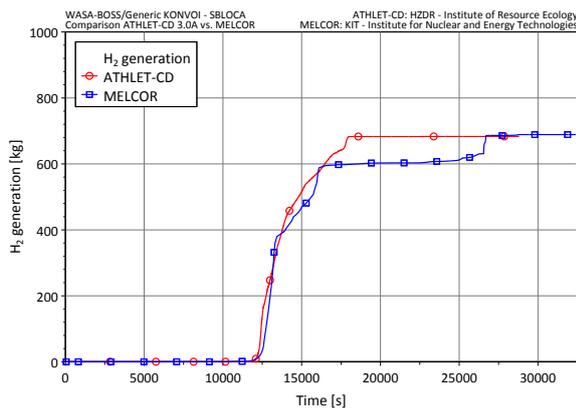


Abb. 7.12: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Kumulierte Masse freigesetzten Wasserstoffs

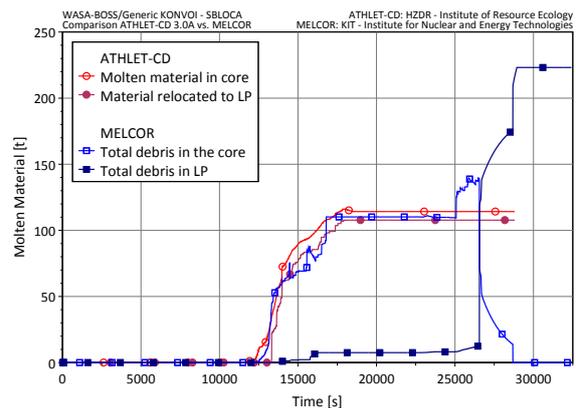


Abb. 7.13: Vergleich ATHLET-CD und MELCOR. Schmelze-/Debrismassen im Kern und Masse an in das LP verlagerten Kernmaterials

8. Analyse von Notfallmaßnahmen für den generischen KONVOI

8.1 Überblick zu möglichen Notfallmaßnahmen

In Abstimmung mit den Projektpartnern im Verbundvorhaben waren von HZDR Notfallmaßnahmen für die beiden Störfallkategorien Station Blackout und Kühlmittelverluststörfall mit kleinem Leck (SBLOCA) für einen generischen KONVOI zu untersuchen. Abb. 8.1 zeigt mögliche Notfallmaßnahme für diese Störfallkategorien.

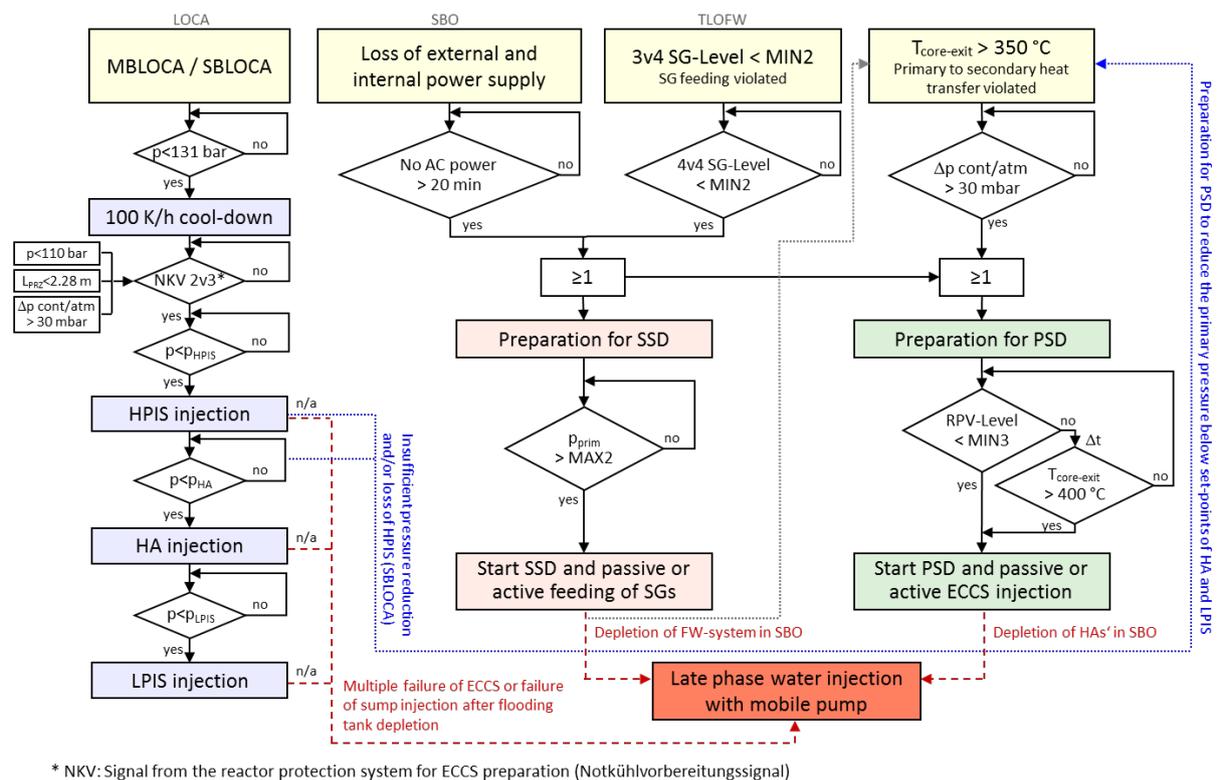


Abb. 8.1: Schema für die Anwendung von Notfallmaßnahmen in Leckstörfällen sowie beim Station Blackout und beim Totalausfall der Speisewasserversorgung für einen generischen DWR vom Typ KONVOI /Pohlner et al. 2014/

Beim kleinen Leck wird zuerst das sekundärseitige Abfahren mit 100 K/h eingeleitet. Mit Anstehen der Notkühlkriterien (Notkühlvorbereitungssignal, NKV) und nach ausreichender primärseitiger Druckabsenkung würden zuerst die HD-Sicherheitseinspeisepumpen, danach die Druckspeicher und im Anschluss die ND- und Nachkühlpumpen einspeisen. Nach Entleerung der Flutbehälter würde die Einspeisung vom Flutbetrieb auf den Sumpfumwälzbetrieb umgestellt.

Beim zu untersuchenden Störfall Station Blackout erfolgt zuerst eine Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger mit Hilfe der sekundärseitigen Abblaseregelung. Durch den Ausfall der Speisewasserversorgung dampfen die Dampferzeuger allmählich aus und nach Zusammenbruch der Wärmeübertragung in den Dampferzeugern steigt die Kühlmitteltemperatur an. Mit Erreichen des Grenzwertes von 350 °C werden die störfallspezifischen Notfallmaßnahmen vorbereitet bzw. eingeleitet. Hierzu gehört die

sekundär- bzw. primärseitige Druckentlastung mit nachfolgender Bespeisung. Die Einleitungskriterien sind so gewählt, dass SDE als vorgelagerte Maßnahme zuerst eingeleitet wird. Im Fall der Unverfügbarkeit oder einer nicht ausreichenden Wirksamkeit kann nachfolgend PDE eingeleitet werden.

Als Notfallmaßnahme wird ebenfalls die Einspeisung in den Primärkreis mittels mobiler Pumpensysteme untersucht. Hierfür sind im ATHLET-CD-Modell des generischen KONVOI FILL-Objekte (Massenstrom/Enthalpie-Randbedingungen) an die ECC-Einspeiseleitungen angekoppelt (siehe Abb. 4.1). Der Massenstrom wird hierfür über eine GCSM-Logik auf Basis des Drucks am Einspeisepunkt ermittelt. Es sind mehrere Pumpenkennlinien hinterlegt:

- 3 generische Pumpenkennlinien mit einer Förderhöhe von 10, 15 und 20 bar,
- Pumpenkennlinie ähnlich einer mobilen Feuerlöschpumpe vom Typ Ziegler Ultra PFPN 10-1500 mit einer Förderhöhe von 16,5 bar und einer maximalen Förderrate von 39 kg/s /Albert Ziegler GmbH 2015/.

8.2 Bestimmung der minimal notwendigen Einspeiseraten

Während eines Störfalls nach erfolgreicher RESA ist die Nachzerfallswärme (NZW) die wesentliche Wärmequelle, die zur Aufheizung des Systems beiträgt. Deshalb muss die NZW aus dem Reaktorkühlkreislauf abgeführt werden. In Szenarien, in denen der Wärmeübergang zur Sekundärseite zusammenbricht (z. B. SBO nach Ausdampfen der Dampferzeuger (DE), SBLOCA nach dem Ende/Ausfall der aktiven und passiven Primärkreiseinspeisung, gefolgt von einer Dampf-/Gasakkumulation in den DE-Rohren), muss die Wärme aus dem Primärkreis durch Dampfabgabe oder Ausströmung von erhitztem Kühlmittel abgeführt werden (z. B. über das Leck in SBLOCA/MBLOCA/LBLOCA-Szenarien oder über das Druckhalterentlastungsventil in SBO-Szenarien). Der dabei auftretende Kühlmittelverlust muss durch eine Einspeisung von weiterem Kühlmittel kompensiert werden. Zur Charakterisierung der Wärmeabfuhr können die folgenden zwei Einspeiseraten definiert werden /Pohlner et al. 2014/:

- W_{sat} : minimale Einspeiserate für eine ausreichende NZW-Abfuhr allein durch Anstieg der sensiblen Wärme (Aufheizung bis Sättigungstemperatur),
- W_{vap} : minimale Einspeiserate für eine ausreichende NZW-Abfuhr durch vollständige Verdampfung des eingespeisten Kühlmittels.

W_{sat} und W_{vap} wurden für das generische KONVOI-Modell als Funktionen der Zeit unter den folgenden Annahmen ermittelt:

- Berechnung der NZW mittels der ATHLET-CD-Module OREST/FIPISO für das Ende des ersten Zyklus' eines generischen KONVOI (nominale Reaktorleistung 3850 MW_{th}, 4 % Anreicherung, UO₂-Brennstoff),

- Temperatur des eingespeisten Kühlmittels $T_{KM} = 35 \text{ °C}$ (gleich der Temperatur in den Flutbecken).

Die notwendigen Einspeiseraten wurden für einen Primärkreisdruck von 1 bar (durchgezogene Linien in Abb. 8.2) sowie 10 bar (gestrichelte Linien in Abb. 8.2) berechnet. Zwei zusätzliche Einspeiseraten wurden wie folgt ermittelt:

- $W_{\text{vap}, \Delta h = h'' - h_{35^\circ}}$: minimale Einspeiserate zur Abfuhr der NZW durch Aufheizung bis Sättigungstemperatur und vollständige Verdampfung,
- $W_{\text{vap}, \Delta h = h_{650^\circ} - h_{35^\circ}}$: minimale Einspeiserate zur Abfuhr der NZW durch Aufheizung bis Sättigungstemperatur, vollständige Verdampfung sowie Überhitzung des Dampfes auf 650 °C .

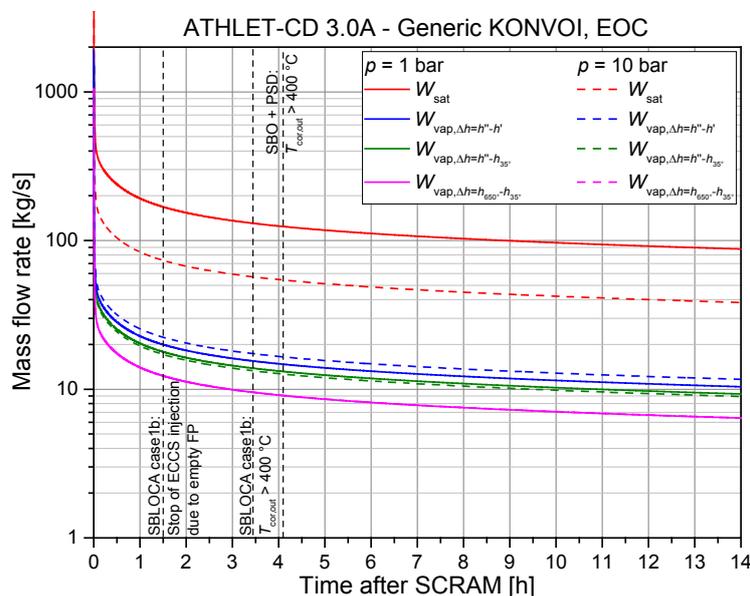


Abb. 8.2: Minimale Einspeiserate zur Abfuhr der NZW durch Aufheizung bis Sättigungstemperatur (W_{sat}), mit vollständiger Verdampfung (W_{vap}), durch Aufheizung und Verdampfung sowie durch Aufheizung ($W_{\text{vap}, \Delta h = h'' - h_{35^\circ}}$), Verdampfung und Dampfüberhitzung ($W_{\text{vap}, \Delta h = h_{650^\circ} - h_{35^\circ}}$)

Nachfolgend wird nur der konservativere Fall $p = 1 \text{ bar}$ diskutiert. Beispielhaft sind drei Störfallzustände hervorzuheben:

1. SBLOCA-Szenario Fall 1b (Szenario ohne sekundärseitiges Abfahren): Ende der Sicherheitseinspeisung nach Entleerung der Flutbecken und Versagen der Umschaltung auf Sumpfumwälzbetrieb etwa $1 \frac{1}{2} \text{ h}$ nach Beginn der Transiente,
2. SBLOCA-Szenario Fall 1b: Beginn der Kernaufheizung (Brennelementaustrittstemperatur $BAT > 400 \text{ °C}$) ungefähr 3 h nach Beginn der Transiente,
3. SBO-Szenario mit Primärkreisdruckentlastung: Beginn der Kernaufheizung ($BAT > 400 \text{ °C}$) ungefähr $3 \frac{1}{2} \text{ h}$ nach Beginn der Transiente.

Für den Zustand 1 muss zusätzliches Kühlmittel eingespeist werden, um ein Absinken des RDB-Füllstandes zu vermeiden und für die beiden Zustände 2 und 3 muss die Kühlmittleinspeisung sofort eingeleitet werden um die Kernaufheizung zu vermeiden. Für die Zustände 1 und 2 ist der Füllstand von zwei der vier Flutbecken weiterhin maximal (390 t Wasser pro Flutbecken entsprechend der Annahmen des generischen KONVOI-Modells), im SBO-Szenario wurde das Inventar aller vier Flutbecken noch nicht aufgebraucht (insgesamt 1560 t Wasser). Die für die drei ausgewählten Störfallzustände minimal benötigten Einspeisemassenströme sind in Tabelle 8.1 zusammengestellt. Die minimale Einspeiserate W_{sat} für die Vermeidung von Kühlmittelverdampfung ist mindestens 8-mal größer als W_{vap} . So beträgt W_{sat} für die Störfallzustände 2 und 3 ungefähr zweimal der (maximalen) Massenstromrate der HD-Sicherheitseinspeisepumpen, so dass für diese beiden Szenarien zwei derart leistungsfähige Pumpen in den Kern einspeisen müssen, um die Kernaufheizung und ebenfalls weitere Verdampfung im Kern zu vermeiden. Kann dagegen ebenfalls die Verdampfung von Kühlmittel zur Kernkühlung beitragen, so reichen erheblich geringere Massenströme (kleinere Pumpen) aus. Werden konstante Einspeiseraten $W_{\text{sat}}/W_{\text{vap}}$ sowie die verbliebenen Flutbeckeninventare als Einspeisereservoir ange-nommen, liegen die möglichen Einspeisedauern zwischen 1 h 15 min und 45 h (je nach Szenario und Einspeiserate). Da der notwendige Einspeisemassenstrom wegen des Abklingens der NZW ebenfalls abfällt, kann die Zeitdauer bis zum Entleeren der Flutbecken gestreckt werden, sofern der Massenstrom entsprechend Abb. 8.2 angepasst wird. Jedoch muss bedacht werden, dass die benötigten Massenstromraten zur Kernkühlung unter den folgenden Bedingungen von der berechneten Kurve abweichen können:

- Die Freisetzung von zusätzlicher Wärme infolge der Zr-Oxidation führt zur Erhöhung der benötigten Massenstromrate.
- Die Freisetzung der volatilen Spaltprodukte aus den Brennstäben und deren Abtransport nach außerhalb des Reaktorkühlkreislaufes reduziert die im Kern freigesetzte NZW /Pohlner et al. 2014, S. 25/.

Aus den vorhergehenden Betrachtungen kann folgende Schlussfolgerung abgeleitet werden: Für die erfolgreiche Anwendung von Störfallmaßnahmen zur Sicherstellung einer ausreichenden Kernkühlung (maximale BAT kleiner 650 °C) muss der in den RDB eingespeiste Massenstrom größer der berechneten, zeitabhängigen Kurve $W_{\text{vap}, \Delta h = h_{650^\circ} - h_{35^\circ}}$ sein. Werden konservativere Bedingungen gefordert, muss eine entsprechend größere Einspeiserate gewährleistet werden: W_{vap} zur Vermeidung von Dampfüberhitzung bzw. W_{sat} zur Vermeidung einer Verdampfung im Kern.

Tabelle 8.1: Notwendige Einspeiseraten für 3 verschiedene Störfallzustände ($p_{\text{primär}} = 1 \text{ bar}$) und daraus resultierende Dauer bis zur Entleerung der verbliebenen Flutbecken

Störfallzustand	1	2	3
W_{sat}	168 kg/s	136 kg/s	130 kg/s
Zeit bis Entleerung der verbleibenden Flutbecken (FB) ¹³	1 h 15 min	1 h 35 min	3 h 20 min
$W_{\text{vap}, \Delta h = h'' - h'}$	20,0 kg/s	16,2 kg/s	15,4 kg/s
Zeit bis Entleerung der verbleibenden FB	10 h 50 min	13 h 20 min	28 h 5 min
$W_{\text{vap}, \Delta h = h'' - h_{35^\circ}}$	17,9 kg/s	14,5 kg/s	13,8 kg/s
Zeit bis Entleerung der verbleibenden FB	12 h 5 min	14 h 55 min	31 h 20 min
$W_{\text{vap}, \Delta h = h_{650^\circ} - h_{35^\circ}}$	12,3 kg/s	10,0 kg/s	9,5 kg/s
Zeit bis Entleerung der verbleibenden FB	17 h 35 min	21 h 40 min	45 h 35 min

8.3 Anwendung von Notfallmaßnahmen im SBO-Fall

8.3.1 Überblick über die durchgeführten Simulationsrechnungen

Für das im Abschnitt 5.3 beschriebene SBO-Störfallszenario wird die Unverfügbarkeit der sekundärseitigen Druckentlastung angenommen. So steht entsprechend des Schemas in Abb. 8.1 die Maßnahme Primärkreisdruckentlastung (PDE) und Späteinspeisung von Wasser mittels mobiler Pumpen zur Verfügung. Es wurden demzufolge diese Störfallmaßnahmen untersucht:

- die Einleitung einer PDE bei unterschiedlichen Brennelementaustrittstemperaturen (BAT) und
- die zusätzliche Einspeisung in den Primärkreis mittels eines mobilen Pumpensystems unter Variation des Einspeisebeginns, des Pumpenförderdrucks und des Anschlusspunktes (heißer Strang / kalter Strang, siehe Schema in Abb. 4.1).

Die Störfalltransienten wurden für eine Dauer von 8 bis 10 h berechnet (möglichst bis zum RDB-Versagen bzw. bis zu einem stabilen Endzustand). Für diese Zeit wird angenommen, dass die sekundärseitige Druckregelung verfügbar ist (batteriebetrieben), sowie dass die DH-Ventile für die Einleitung der PDE geöffnet werden können. Tabelle 8.2 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen.

¹³ Es wird angenommen, dass das gesamte verbliebene Flutbeckeninventar mittels eines Pumpensystems in den RDB eingespeist werden kann. Es wird eine konstante Einspeiserate angenommen. Für die Einspeisung verbleibende Flutbecken: Im Zustand 1 und 2 (SBLOCA) sind noch zwei der vier Flutbecken noch vollständig gefüllt. Im Zustand 3 (SBO mit PDE) sind noch alle vier Flutbecken vollständig gefüllt.

Tabelle 8.2: SBO-Simulationsmatrix

Szenario	Einspeisung mittels eines mobilen Pumpensystems					
	PDE-Einleitekriterium	DS-Einspeisung	Startkriterium	Einspeisort	Nominaler Pumpenförderdruck	Maximale Einspeiserate
SBO ohne Störfallmaßnahmen	-	-	-	-	-	-
SBO mit PDE	BAT > 400 °C	Nach PDE	-	-	-	-
	BAT > 650 °C	Nach PDE	-	-	-	-
	BAT > 980 °C	Nach PDE	-	-	-	-
	BAT > 1200 °C	Nach PDE	-	-	-	-
SBO mit PDE und Einspeisung in den Primärkreis durch ein mobiles Pumpensystem	BAT > 400 °C	Nach PDE	BAT > 400 °C BAT > 650 °C BAT > 1200 °C BAT > 2300 °C	Schleife 2, kalter Strang	16,5 bar	39 kg/s
	BAT > 400 °C	Nach PDE	Schmelzemasse > 1 t ... 100 t	Schleife 2, kalter Strang	16,5 bar	39 kg/s
	BAT > 400 °C	Nach PDE	BAT > 400 °C	Schleife 2, kalter Strang	10 bar 15 bar 20 bar	25 kg/s
	BAT > 400 °C	Nach PDE	BAT > 400 °C	Schleife 2, heißer Strang	10 bar 15 bar 20 bar	25 kg/s

8.3.2 Wesentliche Ergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zusammengefasst und anhand von Zeitverläufen ausgewählter Anlagenparameter diskutiert. Eine umfassendere grafische Darstellung der wesentlichen Anlagenparameter ist /Wilhelm et al. 2016b, Anhang A/ zu entnehmen. Des Weiteren gibt Tabelle 8.3 für ausgewählte Simulationen einen Überblick über die wichtigsten Ereignisse.

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 für ein SBO-Szenario ohne Anwendung von Störfallmaßnahmen gezeigt, beginnt nach etwa 2 h 10 min die Kernschmelze mit dem Aufschmelzen von Absorbermaterial, gefolgt vom Schmelzen der Brennstäbe (Abb. 8.3) und der Freisetzung von Spaltprodukten gegen 2 h 25 min sowie der Verlagerung von geschmolzenem Kernmaterial in das untere Plenum gegen 2 h 35 min. Der RDB versagt etwa 3 ½ h nach Beginn der Transiente (Abb. 8.4).

Bei $t = 1$ h 56 min übersteigt die Brennelementaustrittstemperatur (BAT) 400 °C. Wird zu diesem Zeitpunkt entsprechend der Notfallprozeduren eine PDE durch das vollständige Öffnen der drei Druckhalterventile eingeleitet, so kann durch das nachfolgende Einspeisen der Druckspeicher der RDB wieder aufgefüllt werden. Die Kernaufheizung sowie der Beginn des Brennstoffschmelzens können durch diese Maßnahme um etwa 1 ½ h verzögert werden (Abb. 8.3). Die Verlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum wird gegenüber dem SBO-Szenario ohne PDE um etwa 100 min verzögert und das Versagen des RDB um etwa 4 ½ h (Abb. 8.4).

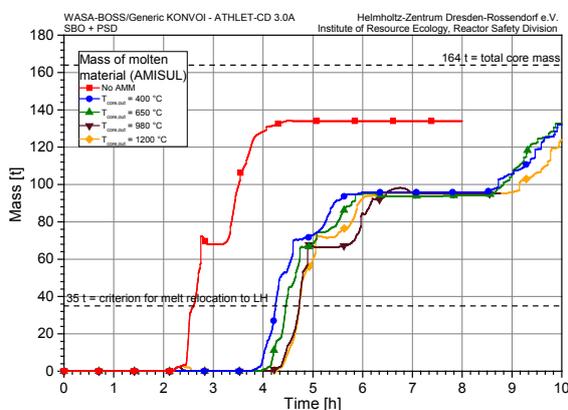


Abb. 8.3: SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustrittstemperaturen. Masse geschmolzenen Kernmaterials

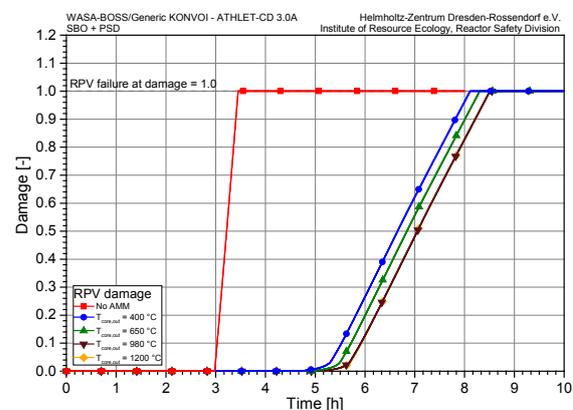


Abb. 8.4: SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustrittstemperaturen. RDB-Schädigungsfaktor

Es wurde weiterhin untersucht, welche Auswirkungen Verzögerungen bei der Einleitung der PDE zur Folge haben. So wurde der Beginn der PDE variiert: bei BAT = 650 °C ($t = 2$ h 6 min), BAT = 980 °C ($t = 2$ h 18 min) und BAT = 1200 °C ($t = 2$ h 23 min). Die spätere Einleitung der PDE hat zur Folge, dass die Druckspeicher ebenfalls später einspeisen und der Beginn der zweiten Kernaufheizung verzögert eintritt (bis zu 20 min). Ebenso kommt es zu einer zusätzlichen Verzögerung für den Beginn

des Brennstoffschmelzens (Abb. 8.3), für die Materialverlagerung in das untere Plenum sowie das Versagen des RDB (bis zu 20 min, Abb. 8.4). Wird die PDE erst für eine BAT > 650 °C (nach 2 h 6 min) eingeleitet, so kann das Aufschmelzen von Absorbermaterial nicht verhindert werden. Wird die PDE erst bei BAT > 980 °C (nach 2 h 18 min) eingeleitet, so ist eine frühzeitige Freisetzung von Spaltprodukten (etwa 2 ½ h nach Beginn zu erwarten, Abb. 8.6). Ebenfalls muss bei Einleiten der PDE bei BAT > 650 °C bereits vor vollständigem Wiederfluten mit einer Freisetzung von H₂ gerechnet werden. Wird die PDE beispielsweise erst bei 980 °C eingeleitet, so kommt es in dieser Phase zu einer Freisetzung von 9 kg H₂, bei einem Szenario mit PDE bei 1200 °C beträgt diese frühzeitige Freisetzung bereits 37 kg (Abb. 8.9).

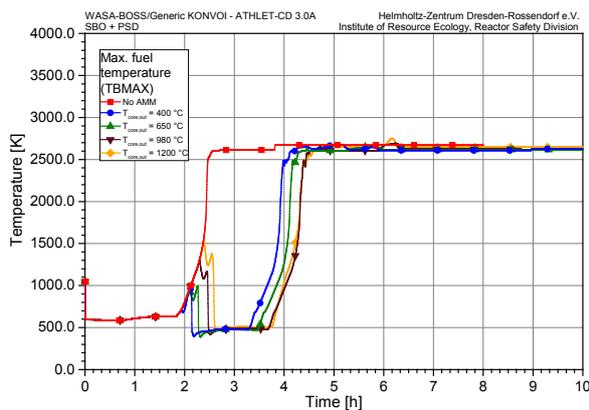


Abb. 8.5: SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustritts-temperaturen. Maximale Brennstofftemperatur

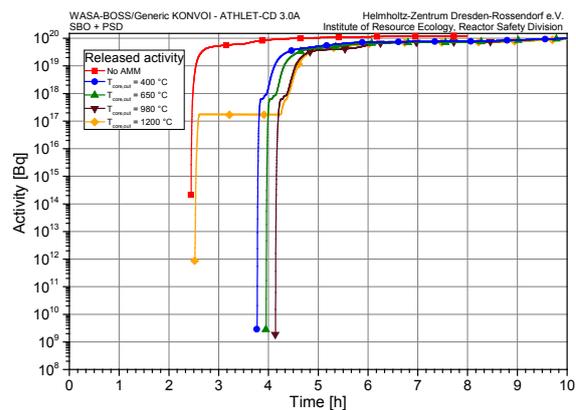


Abb. 8.6: SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen Kernaustritts-temperaturen. Freigesetzte Aktivität (innerhalb des RDB)

Die Anwendung der PDE als einziger Störfallmaßnahme in einem SBO-Störfall kann die Kernschmelze aufgrund des begrenzten Kühlmittelinventars der Druckspeicher nicht verhindern, sondern nur verzögern. Deswegen wurde die PDE (bei BAT = 400 °C) mit der zusätzlichen Maßnahme der Kühlmittleinspeisung in den Primärkreis durch ein mobiles Pumpensystem (Förderdruck 16,5 bar, nominaler Fördermassenstrom 39 kg/s, Einspeisung in den kalten Strang von Schleife 2) kombiniert. In ATHLET-CD-Variationsrechnungen wurde das Startkriterium für die Pumpeneinspeisung variiert (BAT = 400 °C/ 650 °C/ 1200 °C/ 2300 °C bzw. Kernzustände mit bereits einer definierten Masse an Kernschmelze). Die Analysen zeigten, dass für den untersuchten BAT-Temperaturbereich sowie bei Schmelzmassen bis zu 20 t das weitere Fortschreiten der Kernschmelze gestoppt und der Kern in einen kühlbaren Zustand überführt werden kann (Abb. 8.7). Für den späten Beginn der Einspeisung bei BAT = 2300 °C oder Schmelzmasse > 15 t erfahren einzelne Kernbereiche (im Modell durch Kontrollvolumen abgebildet) infolge von Blockaden keine Abkühlung (Hotspots). Ob diese Kernbereiche langfristig gekühlt werden können, muss in zukünftigen Analysen untersucht werden. Das Modell zeigte unter den gewählten Einspeisebedingungen zudem, dass eine Kernmaterialverlagerung in das untere Plenum

und RDB-Versagen vermieden werden kann. Erfolgt der Beginn der Einspeisung in den Kern dagegen erst bei Schmelzmassen ≥ 25 t, so schreitet die Kernschmelze (Abb. 8.7) wegen einer zu geringen und zeitweise unterbrochenen Einspeisung weiter voran (langsames Wiederfluten des RDB und Kern). Das im Eingabedatensatz definierte Kriterium für die Verlagerung von Kernmaterial (Schmelzmasse = 35 t) wird überschritten und damit ein Schmelzepool im unteren Plenum gebildet. Das verwendete RDB-Schädigungsmodell (ASTOR-Modell) sagt für diese Fälle immer ein Versagen des RDB voraus (Schädigungsfaktor = 1,0, siehe Abb. 8.8). Der nach der Verlagerung verbliebene noch nicht geschmolzene Teil des Reaktorkerns konnte bei allen untersuchten Varianten nach dem Beginn der Einspeisung gekühlt und damit ein weiteres Voranschreiten der Kernschmelze gestoppt werden. Aus den Analysen können jedoch nur Aussagen bis zum Versagen des RDB abgeleitet werden. So ist nach dem Versagen des RDB im Bereich der unteren Kugelkalotte ein Ausströmen des im RDB enthaltenen Kühlmittels in die Reaktorgrube und damit eine erneute Freilegung und Schmelze des verbliebenen Restkerns zu erwarten. Diese Phänomene können jedoch mit dem vorliegenden Datensatz nicht gerechnet werden.

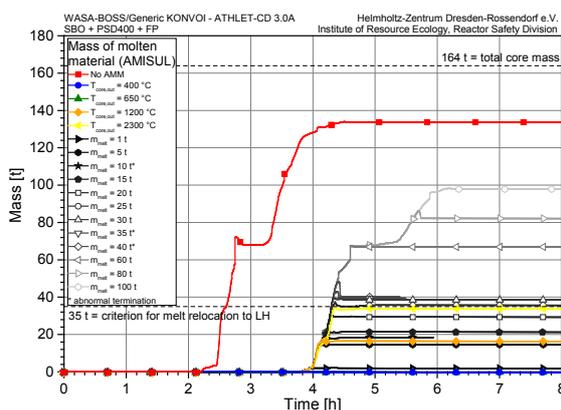


Abb. 8.7: SBO mit Anwendung der PDE bei BAT 400 °C und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. Masse des geschmolzenen Kernmaterials

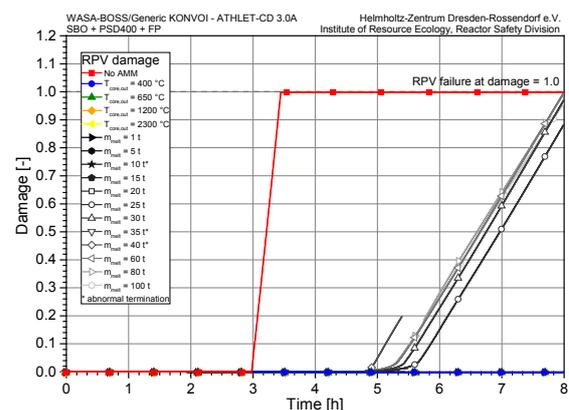


Abb. 8.8: SBO mit Anwendung der PDE bei BAT 400 °C und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. RDB-Schädigungsfaktor

Für alle untersuchten alternativen SBO-Szenarien führte die Primärkreisdruckentlastung und die darauf folgende passive Einspeisung aus den Druckspeichern zu einer Verzögerung der Freisetzung signifikanter Wasserstoffmengen um etwa 1 ½ h (Abb. 8.9 und Abb. 8.10). Durch die zusätzliche Einspeisung mittels einer mobilen Pumpe kann die Menge an freigesetztem Wasserstoff signifikant reduziert werden. Die Reduktion fällt dabei umso stärker aus, je eher die Einspeisung beginnt (Abb. 8.10). Die Simulationen zeigen, dass trotz einer während der zusätzlichen Wassereinspeisung erhöhten Wasserstofffreisetzungsrates die Gesamtmenge an freigesetztem Wasserstoff niedriger als in einem Szenario ohne jegliche Störfallmaßnahmen verbleibt.

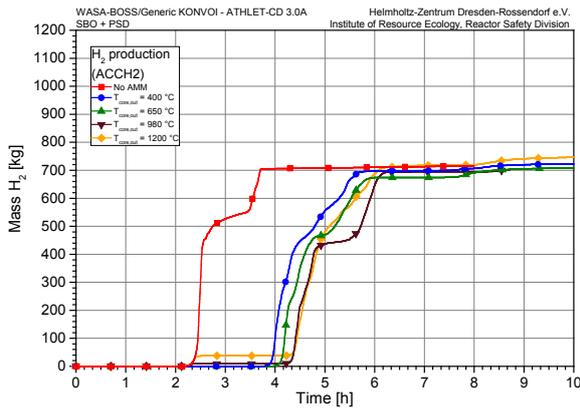


Abb. 8.9: SBO mit Anwendung der PDE bei unterschiedlichen BAT. Masse des freigesetzten H_2

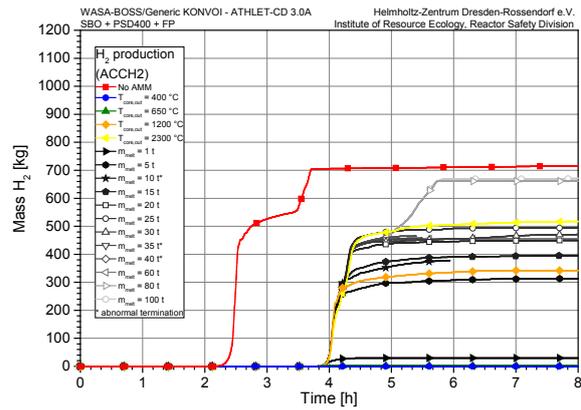


Abb. 8.10: SBO mit Anwendung der PDE bei $BAT = 400\text{ °C}$ und Einspeisung eines mobilen Pumpensystems. Masse des freigesetzten H_2

Für alle alternativen SBO-Szenarien konnte gezeigt werden, dass die PDE mit darauffolgender passiver Einspeisung durch die Druckspeicher zu einer Verzögerung der Kernschmelze, Verlagerung in das untere Plenum und damit zu einer Verzögerung der im Primärkreis freigesetzten Aktivität führt (Abb. 8.6). Durch die zusätzliche aktive Einspeisung mittels eines mobilen Pumpensystems kann die insgesamt während des Störfalls freigesetzte Aktivität signifikant reduziert werden (Abb. 8.11).

Beginnt die Einspeisung mittels des mobilen Pumpensystems unmittelbar mit Einleitung der PDE bei $BAT = 400\text{ °C}$, so kann die Freisetzung von Spaltprodukten vermieden werden (Abb. 8.11). Durch die Druckentlastung fällt der Primärkreisdruck bis unter den nominalen Förderdruck des Pumpensystems (16,5 bar) und verbleibt danach unterhalb dieses Druckniveaus. In diesem Fall kann das Pumpensystem mit einer hohen Massenstromrate einspeisen (ungefähr gleich des Nominalwertes von 39 kg/s) und die maximale Hüllrohrtemperatur bleibt kleiner als 700 °C .

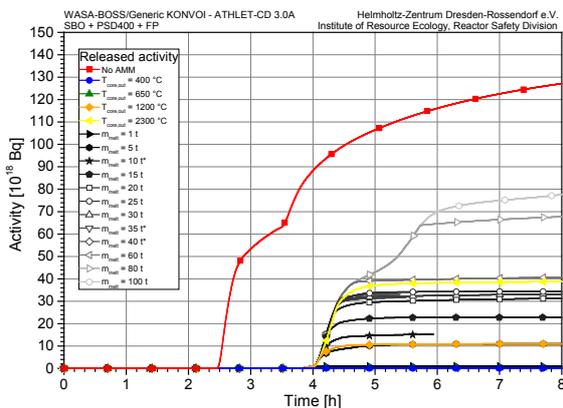


Abb. 8.11: SBO mit Anwendung der PDE bei $BAT = 400\text{ °C}$ und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. Freigesetzte Aktivität (innerhalb des RDB)

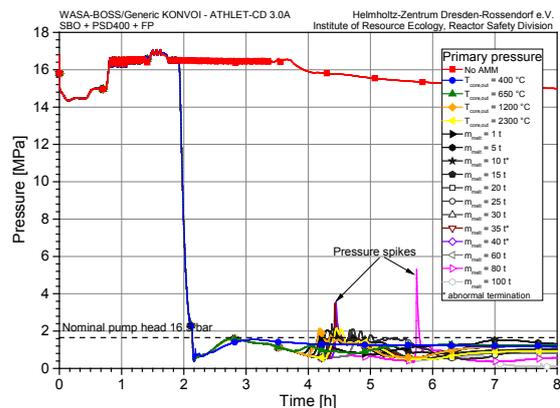


Abb. 8.12 SBO mit Anwendung der PDE bei $BAT = 400\text{ °C}$ und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem. Primärkreisdruck

Erfolgt jedoch nach der bei 400 °C durchgeführten PDE die Einspeisung zeitlich verzögert bei einer BAT = 650 °C (Kernaufheizung nach vollständiger Entleerung der Druckspeicher), so kommt es zur Hüllrohrdehnung und das Kriterium für einen Hüllrohrschaden wird erreicht (38 % azimuthale Dehnung). Volatile Spaltprodukte werden innerhalb des Primärkreises freigesetzt (ungefähr $2,3 \cdot 10^{17}$ Bq).

Für einige der alternativen SBO-Szenarien zeigten die Simulationen, dass eine spät durchgeführte Einspeisung bei einem bereits stark geschmolzenen Kern (z. B. im Fall des Einspeisebeginns bei 80 t Schmelze) zu einem starken Ansteigen des Primärkreisdruckes führen kann (Druckspitzen mit bis zu 53 bar, siehe Abb. 8.12). Diese resultieren aus einer starken Verdampfung, wenn kaltes Kühlwasser auf heißes und geschmolzenes Kernmaterial trifft.

Des Weiteren wurde der Einfluss des Pumpenförderdrucks und des Einspeiseorts der mobilen Pumpe untersucht. Zunächst wurde dafür ein Szenario mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung mit maximaler Einspeiserate von 25 kg/s und Pumpenförderdrücken von 10 bar, 15 bar und 20 bar untersucht. Das Modell zeigt dabei für dieses Szenario, dass Pumpenförderdrücke ≥ 15 bar ausreichen, um eine Kernschmelze und die Freisetzung von Spaltprodukten zu verhindern. Bei einem Pumpenförderdruck von 15 bar kommt es jedoch infolge zu hohen Primärkreisdrucks zu einer zeitweiligen Unterbrechung der Einspeisung (Abb. 8.13) und einem zeitweiligen erneuten Absinken des RDB-Füllstandes (Abb. 8.14). Bei dem noch geringeren Förderdruck von 10 bar zeigen die Ergebnisse eine unzureichende Einspeisung sowie aufgrund eines Primärkreisdrucks > 10 bar eine zeitweilige Unterbrechung für die Dauer von 1 h 15 min. Folglich kommt es zur Kernaufheizung, einer partiellen Kernschmelze (Abb. 8.15) und einer signifikanten H₂-Freisetzung (Abb. 8.16). Jedoch sinkt infolge verminderter Dampfproduktion der Primärkreisdruck wieder ab, die Einspeisung setzt wieder ein und der RDB-Füllstand kann bei etwa 4–4,5 m stabilisiert werden und ab etwa 4 h nach Beginn setzt ein langsames Wiederauffüllen des RDB ein (Abb. 8.14). In der Folge kommt gegen 4 h 30 min das Fortschreiten der Kernschmelze bei einer Schmelzemasse von 10,5 t zum Erliegen (Abb. 8.15) und es wird keine Verlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum und damit kein Versagen des RDB beobachtet.

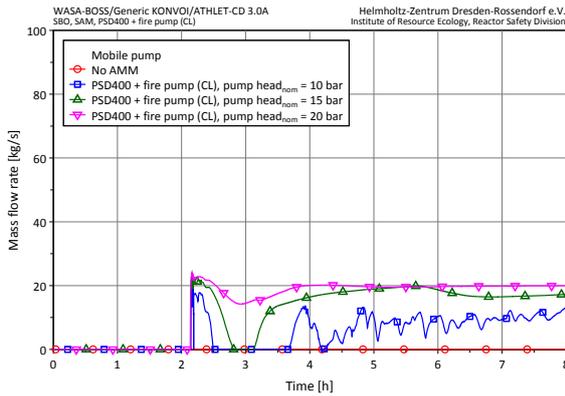


Abb. 8.13: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Einspeisemassenstrom

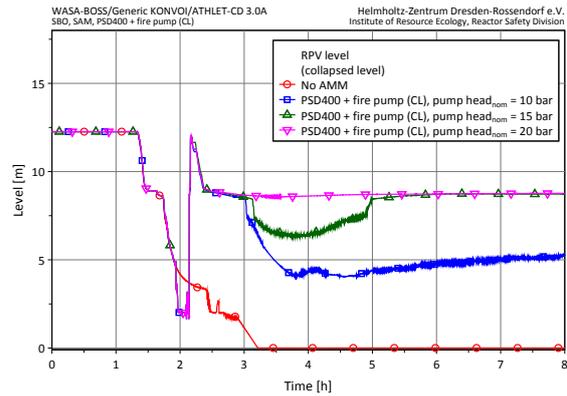


Abb. 8.14: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. RDB-Füllstand

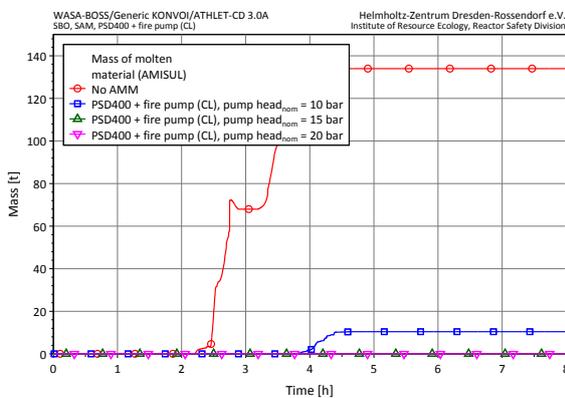


Abb. 8.15: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Schmelzmasse

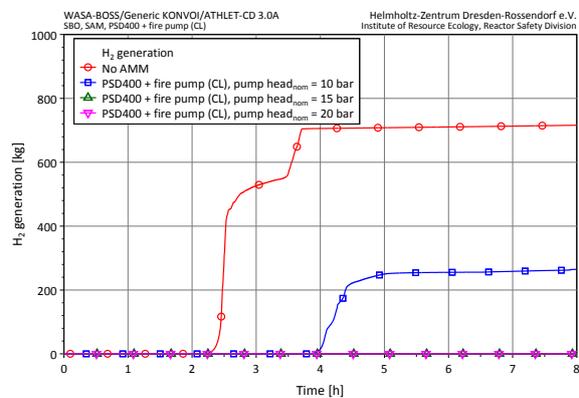


Abb. 8.16: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und kaltseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Freisetzung von Wasserstoff

Erfolgt die Einspeisung dagegen auf der heißen Seite (bei sonst gleichen Annahmen: PDE bei BAT = 400 °C, maximale Einspeiserate von 25 kg/s und wieder Variation der Pumpenförderdrücke von 10 bar, 15 bar und 20 bar), so kann für die Pumpenförderdrücke 15 bar und 20 bar gezeigt werden, dass eine Kernschmelze ähnlich wie bei der Einspeisung auf der kalten Seite vermieden kann. Bei dem niedrigeren Förderdruck von 10 bar zeigt sich jedoch gegenüber der kaltseitigen Einspeisung eine geringere Effektivität. Wie bei der kaltseitigen Einspeisung wird die heißseitige Einspeisung aufgrund zu großen Primärkreisdruckes für die Dauer von etwa 1 h 15 min unterbrochen. Ein Vergleich der Einspeisemassenströme in der darauffolgenden Phase (Vgl. Abb. 8.13 mit Abb. 8.17) ergibt ähnliche Massenströme, jedoch wird bei heißseitiger Einspeisung der in den Kern eingespeiste Massenstrom infolge einer Dampfgegenströmung im heißen Strang reduziert (etwa um 30 %). Der verbleibende Flüssigkeitsmassenstrom wird in die äußere Kernsektion eingespeist (Scoop-Modell, siehe /Lerchl et al. 2012/). Der äußere Kanal ist teilweise blockiert, die Flüssigkeit wird in

diesem Kanal verdampft und erreicht nur in sehr begrenztem Maße die inneren Kernsektionen. In der Folge kann sich der RDB-Füllstand nicht stabilisieren und fällt bis auf den Kerneintritt ab (Abb. 8.18). Damit ist der Kern vollständig freigelegt und die Kernschmelze schreitet voran, bis bei etwa $t = 7$ h das Kriterium zur Schmelzeverlagerung in das untere Plenum (35 t Schmelze) erreicht wird (Abb. 8.19). Der Schmelzepool im unteren Plenum führt ab etwa $t = 7$ h 30 min zu einer Schädigung der RDB-Wand, jedoch kann das Versagen des RDB bis zum Ende der gerechneten Transiente (8 h) nicht beobachtet werden (Abb. 8.20).

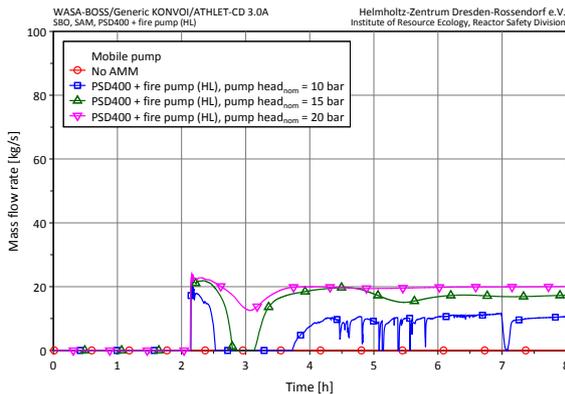


Abb. 8.17: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Einspeisemassenstrom

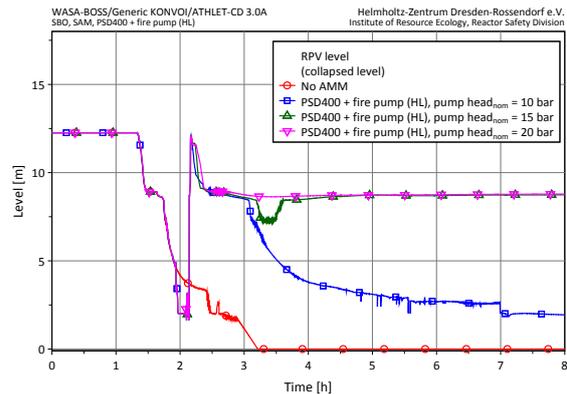


Abb. 8.18: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. RDB-Füllstand

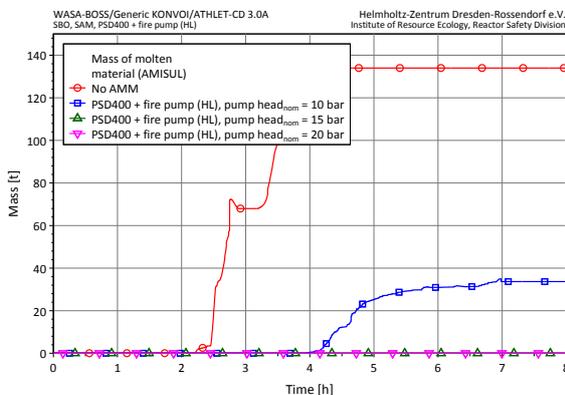


Abb. 8.19: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Schmelzemasse

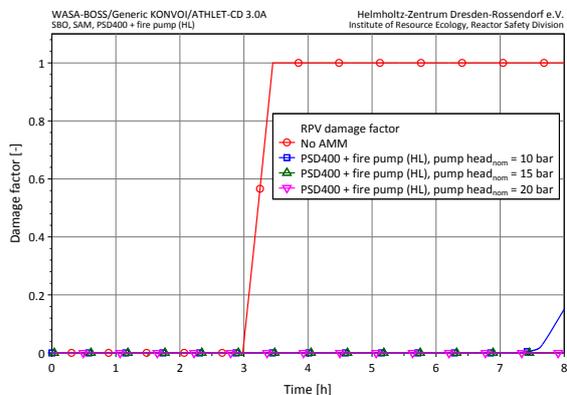


Abb. 8.20: SBO mit PDE bei BAT = 400 °C und heißseitiger Einspeisung durch mobiles Pumpensystem. Schädigung des RDB

Bei der kaltseitigen Einspeisung strömt das eingespeiste Kühlmittel durch den kalten Strang und den Ringspalt in das untere Plenum und wird von dort auf alle Kanäle verteilt. Damit können die Kanäle gleichmäßiger als bei heißseitiger Einspeisung gekühlt werden. Aus den hier gezeigten ATHLET-CD-Simulationen ist ersichtlich, dass für ein mobiles Pumpensystem mit niedrigem Pumpenförderdruck (10 bar) die kaltseitige Einspeisung effizienter als die heißseitige Einspeisung ist. Für größere Pum-

penförderhöhen (15 bar) ist eine leicht effizientere Einspeisung über die heiße Seite zu beobachten und bei einer Pumpenförderhöhe von 20 bar sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

Die bisher diskutierten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden: Im Rahmen der getroffenen Annahmen zeigen die Simulationsergebnisse, dass für die untersuchten Störfallszenarien die Einspeisung mit einer mobilen Pumpe mit einem nominalen Förderdruck ≥ 15 bar und einem Fördermassenstrom von 25 kg/s in der Lage ist, das Fortschreiten des Störfalls hin zu einem schweren Störfall zu vermeiden (im Falle rechtzeitiger Einspeisung vor Beginn der zweiten Kernaufheizung nach vollständiger Entleerung der Druckspeicher) oder dessen Auswirkungen zu begrenzen (im Falle später Einspeisung).

Alle durchgeführten Simulationen obliegen dabei der Annahme eines konstanten Containmentdrucks von 1 bar. Diese Annahme ist als eine nicht-konservative Annahme für die Einspeiserate des mobilen Pumpensystems zu werten. Unter Störfallbedingungen kann der Containmentdruck nach dem Ausströmen von Kühlmittel durch die DH-Entlastungs- und –sicherheitsventile ansteigen (max. 6 bar anstatt von 1 bar /Gesellschaft für Reaktorsicherheit 1990/). Dies führt ebenfalls zu einem Anstieg des Drucks im Primärkreis und damit zu einer Reduktion des Einspeisemas senstroms – unter Umständen auch zu einer Unterbrechung/Ausfall der Einspeisung. Ein höherer Pumpenförderdruck wird gegebenenfalls notwendig. Deshalb sind weitere Analysen notwendig, um den Einfluss des Containmentdrucks auf den Verlauf der Transienten zu ermitteln. Eine Möglichkeit hierfür wäre die Implementierung eines szenarioabhängigen zeitlichen Containmentdruckverlaufs in Form tabellarischer Werte. Eine umfassendere Möglichkeit ergäbe sich aus der Kopplung des vorliegenden Modells mit einem Containmentsmodell (z.B. Kopplung von ATHLET-CD mit COCO-SYS).

Eine weitere signifikante Einschränkung des vorliegenden Modells ist das vom Benutzer definierte Kriterium für den Beginn der Kernverlagerung in das untere Plenum (siehe Abschnitt 4.2.6).

Tabelle 8.3: SBO. Wesentliche Ereignisse

Ereignis	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO	SBO		
	keine AMM	PDE400	PDE650	PDE980	PDE1200	PDE400 (CL)	PDE400 + FP650 (CL)	PDE400 + FP1200 (CL)	PDE400 + FP2300 (CL)	keine AMM	PDE400	PDE650	PDE980	PDE1200	PDE400 (CL)	PDE400 + FP650 (CL)	PDE400 + FP1200 (CL)	PDE400 + FP2300 (CL)	
Beginn SBO	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	
DE leer (DE1/DE2)	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	
RDB-Füllstand < MIN3 (Erstmal/letztmals)	1 h 43 min	1 h 43 min/ 2 h 49 min	1 h 43 min/ 2 h 59 min	1 h 43 min/ 3 h 11 min	1 h 43 min/ 3 h 16 min	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	
Erste H ₂ -Freisetzung (Zircalloyoxidation)	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	
Einleitung PDE	-	1 h 56 min	2 h 6 min	2 h 18 min	2 h 23 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	
Beginn DS-Einspeisung	-	2 h 5 min	2 h 15 min	2 h 26 min	2 h 31 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	
Druckspeicher leer	-	2 h 11 min	2 h 19 min	2 h 30 min	2 h 35 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	
Aktivierung FLP/ Beginn Einspeisung	-	-	-	-	-	1 h 58 min/ 2 h 8 min	3 h 46 min/ 3 h 46 min	4 h 2 min 4 h 2 min	4 h 16 min 4 h 16 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Beginn des Absorberschmelzens	2 h 11 min	3 h 44 min	3 h 55 min	2 h 11 min	2 h 11 min	-	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Gesamtmasse H ₂ > 10 kg	2 h 19 min	3 h 54 min	4 h 5 min	4 h 14 min	2 h 20 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Freisetzung Spaltprodukte (innerhalb RDB)	2 h 27 min	3 h 46 min	3 h 57 min	4 h 9 min	2 h 31 min	-	3 h 52 min	3 h 49 min	3 h 49 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Beginn Brennstabschmelzen	2 h 27 min	3 h 57 min	4 h 8 min	4 h 21 min	4 h 21 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Verlagerung von Kernmaterial in das LP	2 h 36 min	4 h 15 min	4 h 27 min	4 h 44 min	4 h 44 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
RDB-Versagen	3 h 27 min	8 h 7 min	8 h 18 min	8 h 30 min	8 h 31 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 8.3 (Forts.): SBO. Wesentliche Ereignisse

Ereignis	SBO	PDE400 + keine AMM	FP1t (CL)	PDE400 + FP5t (CL)	PDE400 + FP20t (CL)	PDE400 + FP25t (CL)	PDE400 + FP30t (CL)	PDE400 + FP50t (CL)	PDE400 + FP60t (CL)	PDE400 + FP80t (CL)
Beginn SBO	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
DE leer (DE1/DE2)	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min
RDB-Füllstand < MIN3 (Erstmals/letztmals)	1 h 43 min	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3
Erste H ₂ -Freisetzung (Zircalloyoxidation)	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min
Einleitung PDE	-	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min	1 h 56 min
Beginn DS-Einspeisung	-	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min	2 h 5 min
Druckspeicher leer	-	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min	2 h 11 min
Aktivierung FLP/ Beginn Einspeisung	-	3 h 52 min	4 h 1 min	4 h 12 min	4 h 15 min	4 h 16 min	4 h 24 min	4 h 36 min	5 h 29 min	
Beginn des Absorber- schmelzens	2 h 11 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min	3 h 46 min
Gesamtmasse H ₂ > 10 kg	2 h 19 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min	3 h 57 min
Freisetzung Spaltpro- dukte (innerhalb RDB)	2 h 27 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min	3 h 49 min
Beginn Brennstab- schmelzen	2 h 27 min	4 h 6 min	3 h 59 min	3 h 59 min	3 h 59 min	3 h 59 min	3 h 59 min	3 h 59 min	3 h 59 min	3 h 59 min
Verlagerung von Kern- material in das LP	2 h 36 min	-	-	-	4 h 19 min	4 h 18 min				
RDB-Versagen	3 h 27 min	-	-	-	> 8 h*	> 8 h*	> 8 h*	7 h 49 min	> 8 h*	> 8 h*

* Ende der Simulation

Tabelle 8.3 (Forts.): SBO. Wesentliche Ereignisse

Ereignis	SBO keine AMM	PDE400 FP400 (CL), 10 bar	PDE400 FP400 (CL), 15 bar	PDE400 FP400 (CL), 20 bar	PDE400 FP400 (HL), 10 bar	PDE400 FP400 (HL), 15 bar	PDE400 FP400 (HL), 20 bar
Beginn SBO	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
DE leer (DE1/DE2)	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min
RDB-Füllstand < MIN3 (Erstmals/letztmals)	1 h 43 min	1 h 43 min/ 2 h 52 min über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ 2 h 54 min über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3	1 h 43 min/ über MIN3
Erste H ₂ -Freisetzung (Zir- calloyoxidation)	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min	1 h 52 min
Einleitung PDE	-	1 h 56 min					
Beginn DS-Einspeisung	-	2 h 5 min					
Druckspeicher leer	-	2 h 11 min					
Aktivierung FLP/ Beginn Einspeisung	-	1 h 58 min/ 2 h 9 min	1 h 58 min/ 2 h 8 min	1 h 58 min/ 2 h 8 min	1 h 58 min/ 2 h 9 min	1 h 58 min/ 2 h 8 min	1 h 58 min/ 2 h 8 min
Beginn des Absorberschmelzens	2 h 11 min	3 h 47 min	-	-	3 h 52 min	-	-
Gesamtmasse H ₂ > 10 kg	2 h 19 min	3 h 59 min	-	-	4 h 7 min	-	-
Max. Hüllrohr- /Schmelztemperatur	2565 °C	2220 °C	695 °C	695 °C	> 3000 °C	695 °C	695 °C
Freisetzung Spaltprodukte (inner- halb RDB)	2 h 27 min	3 h 50 min	-	-	3 h 55 min	-	-
Beginn Brennstabschmelzen	2 h 27 min	4 h 1 min	-	-	4 h 9 min	-	-
Verlagerung von Kernmaterial in das LP	2 h 36 min	-	-	-	6 h 59 min	-	-
RDB-Versagen	3 h 27 min	-	-	-	> 8 h	-	-
Max. RDB-Schädigungsfaktor bei t = 8 h	1,0	0,0	0,0	0,0	0,15	0,0	0,0

* Ende der Simulation

8.4 Anwendung von Notfallmaßnahmen für SBLOCA-Szenarien

8.4.1 Überblick über die durchgeführten Simulationen

Das im Abschnitt 5.2 beschriebene SBLOCA-Störfallszenario mit Nichtverfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens und Versagen der Umschaltung auf Sumpfumwälzbetrieb (Fall 1b) wurde für weitere Analysen der Wirksamkeit von Störfallmaßnahmen herangezogen. Dabei wurde die Wirksamkeit der folgenden Störfallmaßnahmen untersucht:

- Einspeisung in den Primärkreis mittels eines mobilen Pumpensystems,
- passive Einspeisung aus den kaltseitigen Druckspeichern, die zeitverzögert wieder mit dem Primärkreis verbunden werden.

Dabei wurde jeweils der Beginn der Einspeisung variiert (bei unterschiedlichen Brennelementaustrittstemperaturen (BAT) bzw. bei unterschiedlichen Kernschmelzemassen). Zusätzlich wurde der Einfluss einer Primärkreisdruckentlastung auf den Verlauf des Störfalls analysiert.

Die Störfalltransienten wurden für eine Dauer von bis zu 14 h berechnet (möglichst bis zum RDB-Versagen bzw. bis zu einem stabilen Endzustand).

Tabelle 8.4 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen.

Tabelle 8.4: Simulationsmatrix für SBLOCA-Szenario mit und ohne Anwendung von Notfallmaßnahmen

Szenario	Kriterium zur Einleitung der PDE	Kriterium für das Einspeisen der kaltseitigen Druckspeicher	Einspeisung mit mobilem Pumpensystem			
			Startkriterium	Einspeiseort	Nominaler Förderdruck	Nominale Massenstromrate
SBLOCA Fall 1b, Keine AMM	-	-	-	-	-	-
SBLOCA Fall 1b, Primärkreiseinspeisung mittels mobiler Pumpe	-	-	BAT > 400 °C BAT > 650 °C BAT > 1200 °C BAT > 2300 °C	Loop 2 CL	16,5 bar	39 kg/s
	-	-	$m_{\text{Schmelze}} > 1 \text{ t}$...100 t	Loop 2 CL	16,5 bar	39 kg/s
SBLOCA Fall 1b, PDE, Primärkreiseinspeisung mittels mobiler Pumpe	BAT > 400 °C	-	BAT > 400 °C BAT > 650 °C BAT > 1200 °C BAT > 2300 °C	Loop 2 CL	16,5 bar	39 kg/s
	BAT > 400 °C	-	$m_{\text{Schmelze}} > 1 \text{ t}$...100 t	Loop 2 CL	16,5 bar	39 kg/s
SBLOCA Fall 1b, Zeitverzögerte Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher	-	BAT > 400 °C, BAT > 650 °C BAT > 1200 °C, BAT > 2300 °C	-	-	-	-
	-	$m_{\text{Schmelze}} > 1 \text{ t} \dots 100 \text{ t}$	-	-	-	-
SBLOCA Fall 1b, PDE, Zeitverzögerte Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher	BAT > 400 °C	BAT > 400 °C, BAT > 650 °C BAT > 1200 °C, BAT > 2300 °C	-	-	-	-
	BAT > 400 °C	$m_{\text{Schmelze}} > 1 \text{ t} \dots 100 \text{ t}$	-	-	-	-

8.4.2 Primärkreiseinspeisung mit mobilem Pumpensystem

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zusammengefasst und anhand von Zeitverläufen ausgewählter Anlagenparameter diskutiert. Eine umfassendere grafische Darstellung der wesentlichen Anlagenparameter ist /Wilhelm et al. 2016b, Anhang B.1–B.4/ zu entnehmen. Des Weiteren gibt Tabelle 8.5 für ausgewählte Simulationen einen Überblick über die wichtigsten Ereignisse.

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 für das SBLOCA-Szenario Fall 1b ohne Anwendung von Störfallmaßnahmen gezeigt, beginnt nach etwa 3 h 20 min die Kernschmelze (Abb. 8.22) mit dem Aufschmelzen von Absorbermaterial, gefolgt vom Schmelzen der Brennstäbe und der Freisetzung von Spaltprodukten gegen 3 h 30 min sowie der Verlagerung von geschmolzenem Kernmaterial in das untere Plenum gegen 3 h 50 min. Der RDB versagt etwa 7 ½ h nach Beginn der Transiente (Abb. 8.23).

In den meisten der untersuchten Szenarien konnte der RDB durch das Bespeisen über das mobile Pumpensystem wieder vollständig geflutet werden (RDB-Füllstand > MIN3, siehe Abb. 8.21). Während des Wiederflutens zeigt der Einspeisemassenstrom jedoch aufgrund von Systemdruckschwankungen ein oszillierendes Verhalten und bricht zeitweise zusammen, sobald der Primärkreisdruck 16,5 bar übersteigt. Dieses Verhalten ist bei den Varianten mit frühzeitigem Einspeisebeginn (BAT = 400 °C und BAT = 650 °C) besonders ausgeprägt. Demzufolge weisen diese beiden Varianten einen besonders langen Zeitraum bis zum Erreichen eines Füllstands > MIN3 auf (bis zu 3 h 20 min).

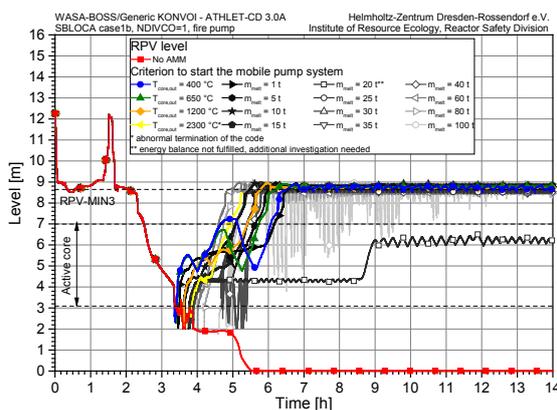


Abb. 8.21: SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. RDB-Füllstand

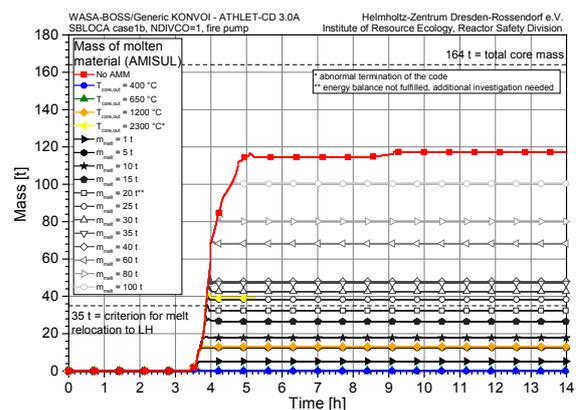


Abb. 8.22: SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Masse geschmolzenen Kernmaterials

In einer Simulationsvariante (Beginn der Einspeisung mit mobiler Pumpe bei einer Schmelzmasse von 20 t) konnte der Kern nicht wieder vollständig geflutet werden. Die Ursache hierfür ist vermutlich ein Problem mit dem Simulationscode (an das Kühlmittel übertragene Leistung \gg durch Nachzerfall und Oxidation freigesetzte Wärme), das zu einer Überschätzung der Dampfproduktion führt und damit zu einem

zu hohen Primärkreisdruck. Das Problem wird gegenwärtig zusammen mit den Programmmentwicklern untersucht.

Durch das Wiederfluten konnte in allen untersuchten Einspeiseszenarien das Fortschreiten der Kernschmelze gestoppt werden (Abb. 8.22). Erreicht die Schmelzemasse AMISUL den im Modell definierten Schwellwert für den Beginn der Verlagerung in das untere Plenum (35 t), so werden etwa 80 % des geschmolzenen Materials dorthin verlagert und es wird die Bildung eines homogenen Schmelzepools mit darüber liegender Kruste angenommen. Der Schmelzsee wird durch das restliche im unteren Plenum verbliebene Kühlmittel gekühlt, das dabei verdampft. Das von dem mobilen Pumpensystem eingespeiste kalte Kühlmittel (Annahme 30 °C entsprechend der Temperatur in den Flutbecken) verstärkt die Wärmeabfuhr und führt zudem zu einem vollständigen oder teilweisen Wiederfluten des RDB. Trotz der signifikanten Wärmeabfuhr über die Oberfläche des Schmelzesees wurde in allen Szenarien mit Verlagerung eine Schädigung der RDB-Wand ermittelt, das zum Kriechbruchversagen des RDB führt. Jedoch ergab sich bei infolge Pumpeneinspeisung wiedergeflutetem RDB eine längere Zeitspanne bis zum RDB-Versagen (Abb. 8.23):

- Variante mit Einspeisebeginn bei einer Schmelzemasse von 20 t (Aktivierung der Einspeisung bei 3 h 47 min): RDB-Versagen um 1 h 57 min (gegenüber der Variante ohne Einspeisung) verzögert,
- Variante mit Einspeisebeginn bei einer Schmelzemasse von 30 t (Aktivierung der Einspeisung bei 3 h 50 min): RDB-Versagen um 1 h 23 min verzögert.

Jedoch ließ sich dieses Ergebnis nicht verallgemeinern, da beispielsweise bei der Variante mit Einspeisebeginn bei einer Schmelzemasse von 25 t (Aktivierung der Einspeisung bei 3 h 49 min) der Zeitpunkt des RDB-Versagens nur um 15 min verzögert wurde. Eine auf derart geringe Modelländerungen (relativ kleine zeitliche Änderung im Beginn der Einspeisung) folgende große Variationsbreite in der Simulation der Unfallspätphase ist ein möglicher Indikator für Instabilitäten in den Modellen der Spätphase. Ähnliche Probleme wurden ebenfalls für einen anderen Störfallcode berichtet (MELCOR, siehe /Denman, Brooks 2015/).

Die Simulationen zeigten weiterhin für alle Störfallvarianten mit zusätzlicher Kühlmiteinspeisung eine signifikante Reduktion der freigesetzten Wasserstoffmenge im Vergleich zum Szenario ohne Einspeisung (Abb. 8.24). In allen Varianten reduzierte sich die H₂-Freisetzungsrates nach dem Wiederfluten auf vernachlässigbar kleine Werte, außer in der Variante mit unvollständigem Wiederfluten infolge des oben beschriebenen Energiebilanzproblems (Freisetzungsrates etwa $5 \cdot 10^{-3}$ kg/s).

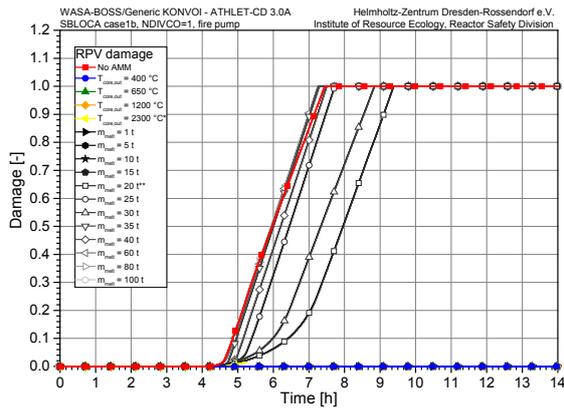


Abb. 8.23: SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Maximaler RDB-Schädigungsfaktor in der unteren Kugelkalotte

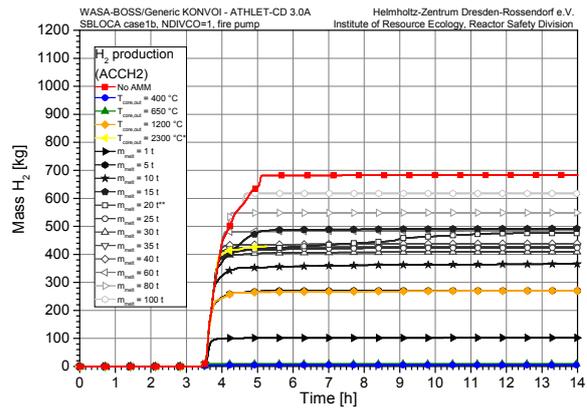


Abb. 8.24: SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Masse an freigesetztem H₂

Eine zusätzliche PDE reduziert den Primärkreisdruck auf Werte < 10 bar und stabilisiert damit den Einspeisemassenstrom des mobilen Pumpensystems. Das Wiederfluten des Kerns erfolgt wesentlich schneller als ohne PDE und ein RDB-Füllstand über MIN3 konnte in allen untersuchten Varianten innerhalb von 40 min bis 1 h erreicht werden (Abb. 8.25). Die Kernschmelze konnte in diesen Szenarien mit Einspeisung ebenfalls gestoppt werden (Abb. 8.26). Insgesamt wurden jedoch deutlich mehr Simulationen aufgrund von Programmfehlern beendet. Eine wesentliche Ursache für diese Abbrüche sind Kernbereiche mit geschmolzenem Material, in die kleinste Mengen Wasserflüssigkeit eintreten und dabei sehr stark überhitzt werden (> 100 K). Das Problem wird derzeit mit den Programmentwicklern diskutiert /Kliem et al. 2017/.

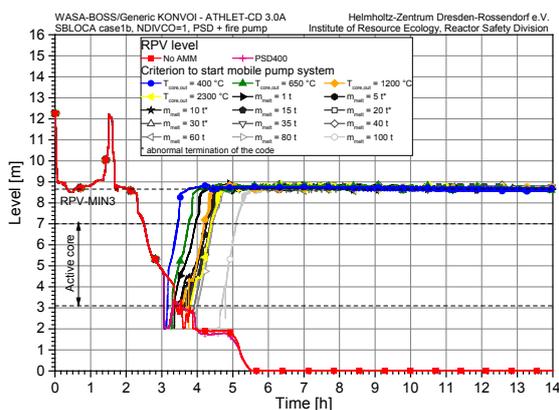


Abb. 8.25: SBLOCA Fall 1b. Primärkreisdruckentlastung bei BAT = 400 °C und Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. RDB-Füllstand

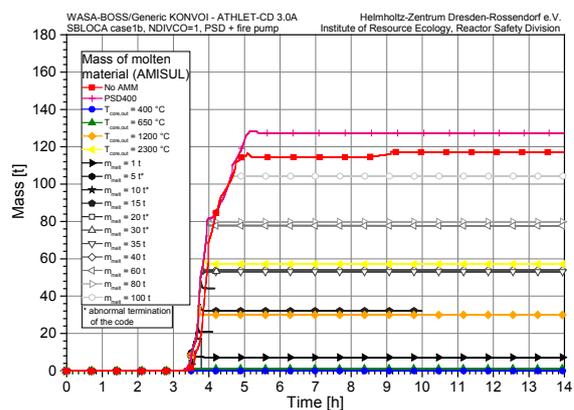


Abb. 8.26: SBLOCA Fall 1b. Primärkreisdruckentlastung bei BAT = 400 °C und Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Masse geschmolzenen Kernmaterials

Des Weiteren wurde die Freisetzung von Spaltprodukten innerhalb des RDB untersucht. Ohne jegliche Störfallmaßnahmen erfolgt im SBLOCA-Szenario 1b eine Aktivitätsfreisetzung in Höhe von $1,1 \cdot 10^{20}$ Bq (bis zum Ende der Simulation bei 14 h nach

Störfallbeginn). Durch die Einspeisung des mobilen Pumpensystems kann die Menge an freigesetzter Aktivität signifikant reduziert werden. Es zeigte sich jedoch, dass die alleinige Anwendung der Einspeisung mit dem Pumpensystem nicht ausreicht um die Freisetzung von Spaltprodukten zu vermeiden – selbst wenn die Einspeisung bereits frühzeitig erfolgt (bei BAT = 400 °C). Aufgrund der langsamen und zeitweise unterbrochenen Einspeisung erreicht die maximale Hüllrohrtemperatur 1180 °C. Dies führt in den Brennstäben zu einem Druckanstieg und damit zum Aufblähen und Bersten der Hüllrohre. ATHLET-CD ermittelt eine Aktivitätsfreisetzung von $4,4 \cdot 10^{17}$ Bq innerhalb des Reaktorkühlsystems.

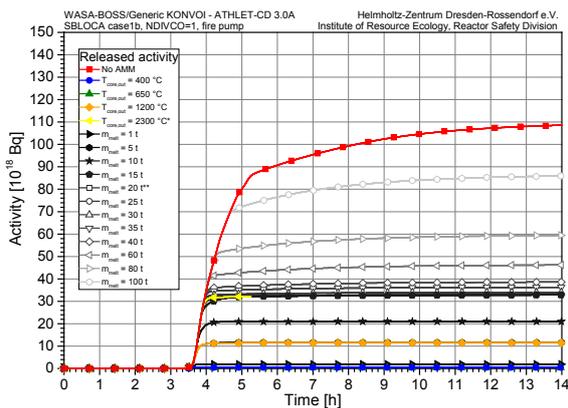


Abb. 8.27: SBLOCA Fall 1b. Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität

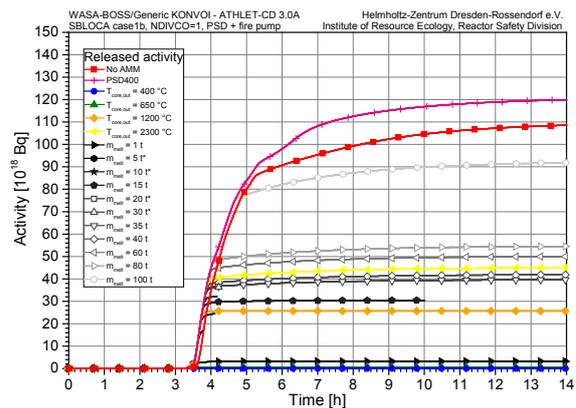


Abb. 8.28: SBLOCA Fall 1b. Primärkreisdruckentlastung bei BAT = 400 °C und Einspeisung mit mobilem Pumpensystem. Innerhalb des RDB freigesetzte Aktivität

Durch eine zusätzliche PDE kann im SBLOCA-Störfall die Freisetzung von Radioaktivität vermieden werden, sofern die PDE bei einer BAT von 400 °C und die mobile Pumpeneinspeisung unverzüglich erfolgt (innerhalb von 2 min nach Auslösen der PDE). Mit der PDE wird der Primärkreisdruck innerhalb von 2 min von zuvor 24 bar unter den Pumpenförderdruck von 16,5 bar abgesenkt und verbleibt dann unterhalb dieses Druckniveaus (weitere Druckabsenkung innerhalb von 15 min bis auf 7,5 bar). Deswegen kann das mobile Pumpensystem einen ausreichend großen Massenstrom einspeisen (etwa gleich der maximal möglichen Massenstromrate von 39 kg/s) und das Wiederfluten des RDB erfolgt wesentlich schneller als ohne PDE. Die maximale Hüllrohrtemperatur während des Wiederflutens wird signifikant reduziert (620 °C mit PDE im Vergleich zu 1180 °C ohne PDE) und ein Aufblähen und Bersten der Hüllrohre wird vermieden. Kommt es nach Durchführung der PDE zu einer zusätzlichen Verzögerung bis zum Beginn der mobilen Pumpeneinspeisung, so ist die Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten trotz schnellem Wiederfluten des RDB nicht zu vermeiden. So werden bereits bei einem Einspeisebeginn bei einer BAT = 650 °C in der Folge Spaltprodukte freigesetzt. Damit beträgt das Zeitfenster für dieses Szenario zwischen Einleitung der PDE und notwendigem Einspeisebeginn weniger als 15 min.

Tabelle 8.5: Wesentliche Ereignisse für Szenarien des Typs SBLOCA Fall 1b mit Primärkreiseinspeisung durch mobiles Pumpensystem

Ereignis	Keine AMM		PDE400 FP400 (CL)		PDE400 FP650 (CL)		PDE400 FP1200 (CL)		PDE400 FP2300 (CL)		PDE400 FP650 (CL)		PDE400 FP1200 (CL)		PDE400 FP2300 (CL)	
	1 s	67 s/	1 s	67 s/	1 s	67 s/	1 s	67 s/	1 s	67 s/	1 s	67 s/	1 s	67 s/	1 s	67 s/
Beginn SBLOCA	1 s		1 s		1 s		1 s		1 s		1 s		1 s		1 s	
Beginn HD-Einspeisung	67 s/		67 s/		67 s/		67 s/		67 s/		67 s/		67 s/		67 s/	
Beginn ND-Einspeisung	1 h 20 min		1 h 20 min		1 h 20 min		1 h 20 min		1 h 20 min		1 h 20 min		1 h 20 min		1 h 20 min	
DS-Level niedrig	1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min	
Flutbecken leer	1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min		1 h 32 min	
RDB-Füllstand < MIN3	22 min/		22 min/		22 min/		22 min/		22 min/		22 min/		22 min/		22 min/	
(erstmalig/endlgütig)	2 h 7 min		über MIN3		über MIN3		über MIN3		über MIN3		über MIN3		über MIN3		über MIN3	
Erste H ₂ -Freisetzung	2 h 44 min		2 h 44 min		2 h 44 min		2 h 44 min		2 h 44 min		2 h 44 min		2 h 44 min		2 h 44 min	
Einleitung PDE	-		-		-		-		-		-		-		-	
Aktivierung mob.Pumpe	-		3 h 3 min/		3 h 36 min/		3 h 3 min/		3 h 3 min/		3 h 3 min/		3 h 3 min/		3 h 33 min/	
Beginn Einspeisung	3 h 20 min		3 h 20 min		3 h 36 min		3 h 36 min		3 h 36 min		3 h 36 min		3 h 36 min		3 h 33 min	
RDB-Level>MIN3 nach Aktivierung mob.Pumpe	6 h 25 min		6 h 9 min		5 h 46 min		-		3 h 41 min		3 h 59 min		4 h 29 min		4 h 45 min	
Beginn des Absorber-materialschmelzens	3 h 23 min		3 h 23 min		3 h 23 min		3 h 23 min		-		3 h 16 min		3 h 16 min		3 h 16 min	
H ₂ > 10 kg	3 h 31 min		-		3 h 31 min		-		-		3 h 29 min		3 h 25 min		3 h 25 min	
Erste Freisetzung SP	3 h 26 min		3 h 28 min		3 h 26 min		-		-		3 h 18 min		3 h 18 min		3 h 18 min	
Beginn BS-Schmelzen	3 h 33 min		-		3 h 33 min		-		-		-		3 h 27 min		3 h 27 min	
Verlagerung in das LP	3 h 52 min		-		-		-		3 h 52 min		-		3 h 45 min		3 h 43 min	
RDB-Versagen	7 h 27 min		-		-		-		n/a*		-		7 h 48 min		7 h 15 min	

Tabelle 8.5 (Forts.): Wesentliche Ereignisse für Szenarien des Typs SBLOCA Fall 1b mit Primärkreiseinspeisung durch mobiles Pumpensystem

Ereignis	Keine AMM		FP		FP**		FP		PDE400/FP*		PDE400/FP*		PDE400/FP*	
	FP <i>m</i> _{Schmelze} =5t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =15t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =20t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =30t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =5t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =15t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =20t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =30t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =5t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =15t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =20t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =30t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =5t	<i>m</i> _{Schmel-} <i>z</i> _e =15t
Beginn SBLOCA	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
DS-Level niedrig	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min
Flutbecken leer	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min
RDB-Füllstand < MIN3 (erstmalig/endgültig)	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3	22 min/ über MIN3
Erste H ₂ -Freisetzung	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min	2 h 44 min
Einleitung PDE	-	-	-	-	-	-	-	-	3 h 1 min	3 h 1 min	3 h 1 min	3 h 1 min	3 h 1 min	3 h 1 min
Aktivierung mob.Pumpe Beginn Einspeisung	-	3 h 36 min	3 h 45 min	3 h 47 min	3 h 50 min	3 h 50 min	3 h 50 min	3 h 50 min	3 h 29 min	3 h 37 min	3 h 40 min	3 h 40 min	3 h 40 min	3 h 43 min
RDB-Level>MIN3 nach Aktivierung mob.Pumpe	-	6 h 0 min	5 h 44 min	-	5 h 34 min	-	5 h 34 min	-	n/a	4 h 33 min	n/a	n/a	n/a	n/a
Beginn des Absorberma- terialschmelzens	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 16 min	3 h 16 min	3 h 16 min	3 h 16 min	3 h 16 min	3 h 16 min
H ₂ > 10 kg	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 31 min	3 h 27 min	3 h 25 min	3 h 25 min	3 h 25 min	3 h 25 min	3 h 25 min
Erste Freisetzung SP	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 26 min	3 h 18 min	3 h 18 min	3 h 18 min	3 h 18 min	3 h 18 min	3 h 18 min
Beginn BS-Schmelzen	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 27 min	3 h 27 min	3 h 27 min	3 h 27 min	3 h 27 min	3 h 27 min
Verlagerung in das LP	3 h 52 min	-	-	-	3 h 52 min	-	3 h 52 min	-	n/a	3 h 45 min	3 h 43 min	3 h 43 min	3 h 43 min	3 h 43 min
RDB-Versagen	7 h 27 min	-	-	-	9 h 23 min	-	9 h 23 min	-	n/a	9 h 32 min	n/a	n/a	n/a	n/a

* Vorzeitiger Abbruch der Simulation.

**Simulation ohne PDE und mit Beginn der Einspeisung bei einer Schmelzmasse *m*_{Schmelze}=20 t zeigt ein Problem mit der Energiebilanz (siehe Beschreibung im Text).

8.4.3 Zeitlich verzögertes Einspeisen der kaltseitigen Druckspeicher

Für das SBLOCA-Szenario 1b wurde weiterhin das verzögerte Einspeisen der kaltseitigen Druckspeicher (DS) als zusätzliche Notfallmaßnahme untersucht und dafür ebenfalls eine Parameterstudie durchgeführt. Jedoch kam es dabei zu einer Vielzahl von Programmabbrüchen während der Druckspeichereinspeisung in einen teilweise geschmolzenen Reaktorkern¹⁴. Es wurde festgestellt, dass eine feinere Nodalisierung des Kerns zu einer Reduzierung der Programmabbrüche führt. Deshalb wurde der Eingabeparameter NDIVCO auf 2 erhöht (NDIVCO = 1 in der bisherigen Version des Eingabedatensatzes). Der Parameter bestimmt die Anzahl der Brennstabvolumina in axialer Richtung (HEAT-Volumen), die mit einem Kontrollvolumen des korrespondierenden Thermofluidobjektes (TFO) gekoppelt sind. Die daraus resultierende Nodalisierung des Kerns ist in Tabelle 8.6 gegeben.

Tabelle 8.6: Vergleich der Kernnodalisierung in Abhängigkeit vom Parameter NDIVCO

Kernsektion	Länge [m]	CV im TFO	Unterteilung des Brennstabs in axialer Richtung – Zahl der CV, NDIVCO=1	Unterteilung des Brennstabs in axialer Richtung – Zahl der CV, NDIVCO=2
Unterer BS-Stopfen	0,338	1	1	1
Aktiver Kernbereich	3,9	20	20	40
Oberer BS-Stopfen	0,19	1	1	1

Es werden nachfolgend nur die Ergebnisse für die feinere Kernnodalisierung gezeigt. Tabelle 8.7 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen. Ein weiterer, durch das Modul AIDA generierter Programmfehler („Crust temperature did not converge“) führte zum vorzeitigen Abbruch fast aller Simulationen mit DS-Einspeisung nach bereits begonnener Verlagerung in das untere Plenum.

¹⁴ In den meisten Fällen war die Ursache der Programmabbrüche eine zu stark überhitzte flüssige Phase („Liquid temperature out of range“) oder ein zu starker Anstieg des Primärkreisdrucks („Pressure raises too fast above critical point“).

Tabelle 8.7: Szenarien vom Typ SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Kriterien für das Wiederzuschalten der kaltseitigen DS

Untersuchtes Szenario	Kriterium für Zuschalten der DS	Einheit	SBLOCA Fall 1b ohne PDE	SBLOCA Fall 1b mit PDE bei BAT = 400 °C
Kein Einspeisen der kaltseitigen DS	n/a	-	SBLOCA Fall 1b ohne AMM	SBLOCA Fall 1b mit PDE
Wiederzuschalten der kaltseitigen DS	BAT erreicht	°C	400, 650, 1200, 2300	400, 650, 1200, 2300
Wiederzuschalten der kaltseitigen DS	Schmelzmasse übersteigt	t	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ¹⁵	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ¹⁵

In den untersuchten SBLOCA-Szenarien führte das zeitlich verzögerte Wiederzuschalten der kaltseitigen Druckspeicher zu einem (teilweisen) Wiederfluten des Reaktorkerns (Abb. 8.29). Das zusätzlich eingespeiste Kühlmittelinventar bewirkte dabei eine Abkühlung der Kernstrukturen und führte im Allgemeinen zu einer Verzögerung des weiteren Verlaufs der Kernschmelze.

Wird diese Maßnahme bereits frühzeitig bei einer Brennelementaustrittstemperatur BAT = 400 °C ergriffen, so kann der Beginn der Kernschmelze im Vergleich zum Szenario ohne jegliche Notfallmaßnahme um ungefähr 1 h 50 min verzögert werden (Abb. 8.30). Die Verlagerung von geschmolzenem Kernmaterial (Abb. 8.30) kann sogar um 3 ¼ h und das Versagen des RDB (Abb. 8.31) um 4 h 20 min verzögert werden. Ohne PDE können die Druckspeicher nicht kontinuierlich in den Primärkreis einspeisen und es vergehen bis zu 4 h bis zur vollständigen Entleerung der Druckspeicher. Während dieser Zeit kommt es zum periodischen Anheben (periodisches Einspeisen) und Absinken des RDB-Füllstands (Verdampfen von Kühlmittel und Abgabe von Dampf über das Leck). Das verdampfende Kühlmittel bewirkt eine Kühlung der Brennstäbe, so dass deren Temperatur für längere Zeit unterhalb der Schmelztemperatur verbleibt.

Ein ähnliches Verhalten wurde für die Varianten mit späterer Zuschaltung der kaltseitigen Druckspeicher bei bereits höheren BAT oder bereits teilweise geschmolzenem Reaktorkern (bis zu 25 t Schmelzmasse, 15 % des Gesamtinventars) gefunden. Für die Variante mit Beginn der verzögerten DS-Einspeisung bei 3 h 48 min wurde für das Versagen des RDB die größte zeitliche Verzögerung ermittelt (etwa 5 h).

¹⁵ Alle Varianten mit einer Schmelzmasse ≥ 35 t führten zu einem vorzeitigen Abbruch der Simulationen (Fehlermeldung des ATHLET-CD Moduls AIDA "Crust temperature not converged").

Ein wesentlicher Nachteil der verzögerten DS-Einspeicherung ist die stark erhöhte Masse an freigesetztem H₂ (bis zu 40 % mehr als im SBLOCA-Szenario ohne jede Notfallmaßnahme, siehe Abb. 8.32).

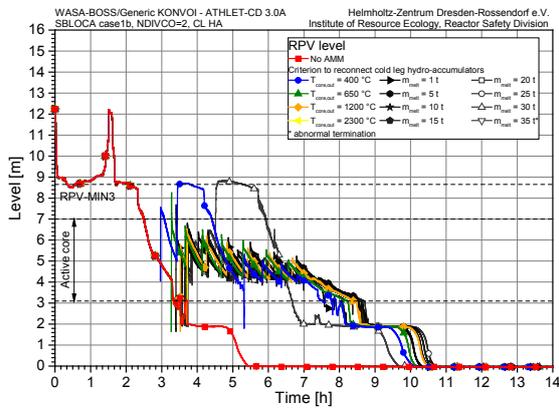


Abb. 8.29: SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Füllstand

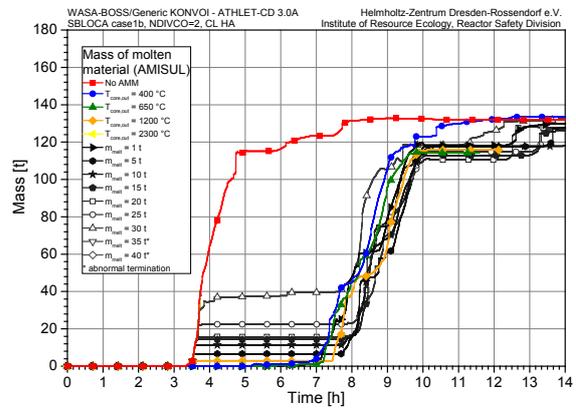


Abb. 8.30: SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Masse geschmolzenen Kernmaterials

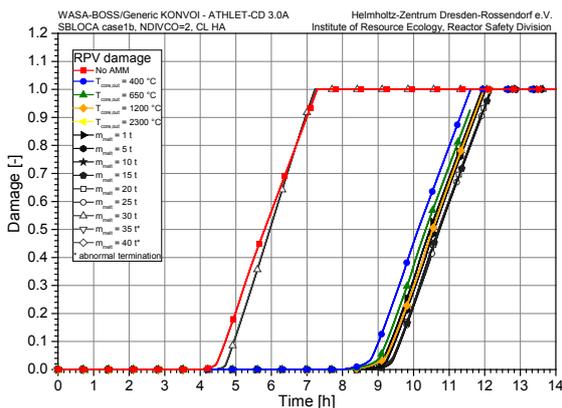


Abb. 8.31 SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Schädigungsfaktor

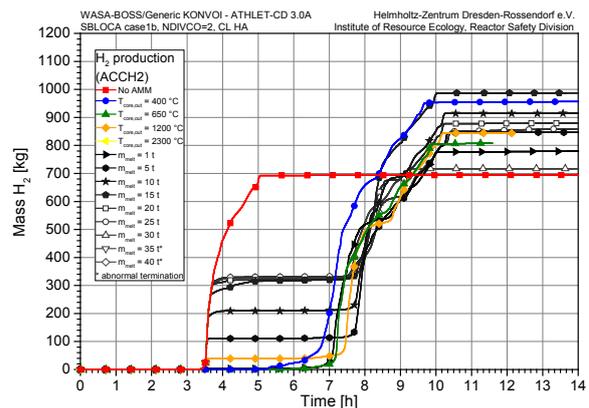


Abb. 8.32 SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Freigesetzte Menge H₂

Erfolgt das Wiedereinschalten der kaltseitigen Druckspeicher dagegen erst nach einer PDE, so können die kaltseitigen Druckspeicher ihr gesamtes Kühlmittelinventar innerhalb von 15 min in den Primärkreis einspeisen. In allen untersuchten Varianten konnte der Füllstand bis oberhalb des Niveaus RPV-MIN3 angehoben werden (Abb. 8.33). Nach dem vollständigen Entleeren der Druckspeicher beginnt der RDB-Füllstand erneut abzusinken, was zu einem Beginn bzw. Fortschreiten der Kernschmelze führt. Im Vergleich zu den Varianten ohne PDE setzt die Verlagerung in das untere Plenum früher ein und ebenso wird ein frühzeitigeres RDB-Versagen beobachtet (ungefähr 2 h früher, siehe Abb. 8.35).

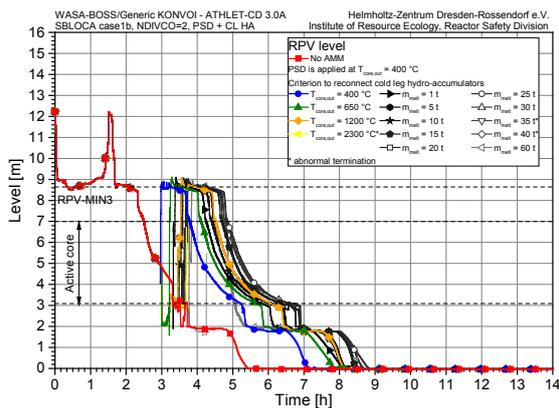


Abb. 8.33: SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Füllstand

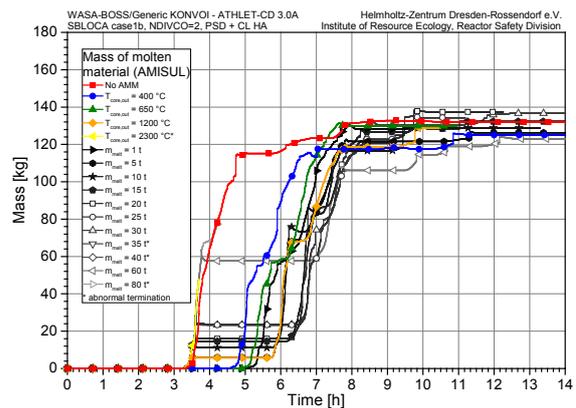


Abb. 8.34: SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Masse geschmolzenen Kernmaterials

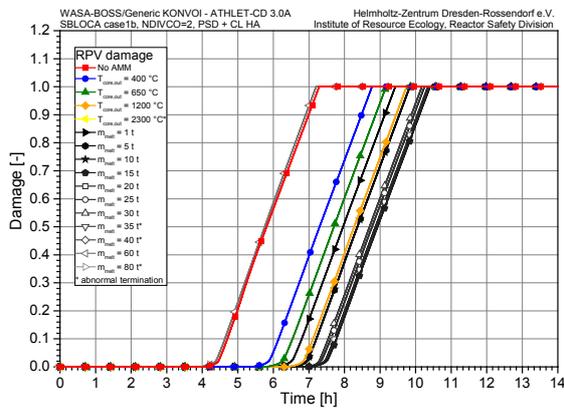


Abb. 8.35 SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. RDB-Schädigungsfaktor

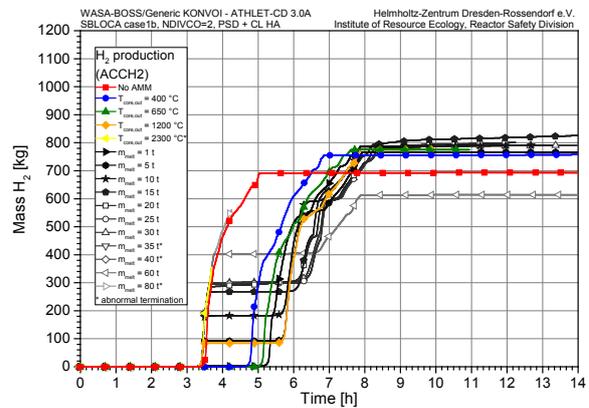


Abb. 8.36 SBLOCA Fall 1b mit PDE und mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher. Freigesetzte Menge H₂

Tabelle 8.8: Wesentliche Ereignisse für Szenarien des Typs SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher

Ereignis	keine AMM**	keine PDE	keine PDE*	keine PDE	keine PDE*	PDE400	PDE400	PDE400	PDE400*
	CL DS 400	CL DS 650	CL DS 1200	CL DS 300	CL DS 400	CL DS 650	CL DS 1200	CL DS 2300	CL DS 2300
Beginn SBLOCA	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
Beginn HD-Einspeis.	67 s/	67 s/	67 s/	68 s/	67 s/	67 s/	67 s/	67 s/	67 s/
Beginn ND-Einspeis.	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min
HL DS-Level niedrig	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min
RDB-Füllstand < MIN3 (Erstmals/letzmals)	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 3 h 22 min	22 min/ 3 h 45 min	22 min/ 4 h 9 min	22 min/ 3 h	22 min/ 3 h
Erste H ₂ -Freisetzung	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min
Einleitung PDE	-	-	-	-	2 h 58 min	2 h 58 min	2 h 58 min	2 h 58 min	2 h 58 min
kalts. DS zugeschaltet	-	2 h 58 min	3 h 16 min	3 h 31 min	3 h 43 min	3 h 13 min	3 h 27 min	3 h 41 min	3 h 41 min
Level>RPV/MIN3 nach kalts. DS zugeschaltet	-	3 h 27 min	-	n/a	2 h 59 min	3 h 15 min	3 h 33 min	n/a	n/a
CL DS-Level niedrig	-	5 h 50 min/ 6 h 49 min	5 h 56 min/ 6 h 34 min	6 h 2 min/ 7 h 14 min	n/a	3 h 4 min/ 3 h 9 min	3 h 16 min/ 3 h 16 min	n/a	n/a
Beginn des Absorber-schmelzens	3 h 19 min	5 h 8 min	5 h 15 min	3 h 19 min	4 h 33 min	4 h 53 min	3 h 14 min	3 h 14 min	3 h 14 min
Freisetzung Spaltprod.	3 h 22 min	5 h 12 min	5 h 51 min	3 h 22 min	4 h 35 min	4 h 55 min	3 h 16 min	3 h 16 min	3 h 16 min
H ₂ > 10 kg	3 h 28 min	5 h 23 min	6 h 38 min	3 h 28 min	4 h 44 min	5 h 5 min	3 h 23 min	3 h 23 min	3 h 23 min
Beginn BS-Schmelzen	3 h 31 min	6 h 41 min	7 h 11 min	3 h 31 min	4 h 47 min	5 h 8 min	3 h 25 min	3 h 25 min	3 h 25 min
Verlagerung in LP	3 h 43 min	7 h 36 min	7 h 44 min	7 h 49 min	5 h 2 min	5 h 27 min	6 h 2 min	3 h 38 min	3 h 38 min
RDB-Versagen	7 h 17 min	11 h 36 min	>11h 35min	11 h 59 min	8 h 46 min	9 h 10 min	9 h 45 min	n/a	n/a

* Vorzeitiger Abbruch der Simulation. ** NDIVCO = 2 wurde für alle in diesem Abschnitt gezeigten Simulationen angewandt. Deshalb weichen die Ergebnisse geringfügig von den zuvor gezeigten Ergebnissen ab.

Tabelle 8.8 (Forts.): Wesentliche Ereignisse für Szenarien des Typs SBLOCA Fall 1b mit verzögerter Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher

Ereignis	keine AMM**		keine PDE		keine PDE		keine PDE		keine PDE		PDE400		PDE400		PDE400	
	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze	CL DS	m Schmelze
Beginn SBLOCA	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
Beginn HD-Einspeis.	67 s/	67 s/	67 s/	67 s/	68 s/	67 s/										
Beginn ND-Einspeis.	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 20 min
HL DS-Level niedrig	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min	1 h 32 min
RDB-Füllstand < MIN3 (Erstmals/letzmals)	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min	22 min/ 2 h 11 min	22 min/ 2 h 9 min
Erste H ₂ -Freisetzung	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min	2 h 46 min
Einleitung PDE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
kalts. DS zugeschaltet	-	3 h 37 min	3 h 44 min	3 h 40 min	3 h 50 min	3 h 40 min	3 h 31 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 33 min	3 h 35 min	3 h 37 min				
Level>RPVMIN3 nach kalts. DS zugeschaltet	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 h 38 min	3 h 41 min	3 h 41 min	3 h 43 min	3 h 45 min	3 h 45 min
CL DS-Level niedrig	-	6 h 7 min/ 7 h 14 min	6 h 7 min/ 7 h 11 min	6 h 16 min/ 6 h 54 min	5 h 52 min/ 7 h 20 min	6 h 16 min/ 6 h 54 min	6 h 16 min/ 6 h 54 min	6 h 16 min/ 6 h 54 min	6 h 16 min/ 6 h 54 min	6 h 16 min/ 6 h 54 min	3 h 37 min/ 3 h 38 min	3 h 41 min/ 3 h 41 min	3 h 41 min/ 3 h 41 min	3 h 43 min/ 3 h 43 min	3 h 44 min/ 3 h 45 min	3 h 44 min/ 3 h 45 min
CL DS leer	-	7 h 14 min	7 h 11 min	6 h 54 min	7 h 20 min	6 h 54 min	3 h 38 min	3 h 41 min	3 h 41 min	3 h 43 min	3 h 45 min	3 h 45 min				
Beginn des Absorber-schmelzens	3 h 19 min	3 h 24 min	3 h 24 min	3 h 19 min	3 h 24 min	3 h 19 min	3 h 14 min									
Freisetzung Spaltprod.	3 h 22 min	3 h 27 min	3 h 27 min	3 h 22 min	3 h 27 min	3 h 22 min	3 h 16 min									
H ₂ > 10 kg	3 h 28 min	3 h 32 min	3 h 32 min	3 h 28 min	3 h 32 min	3 h 28 min	3 h 23 min									
Beginn BS-Schmelzen	3 h 31 min	3 h 35 min	3 h 35 min	3 h 31 min	3 h 35 min	3 h 31 min	3 h 25 min									
Verlagerung in LP	3 h 43 min	8 h 24 min	8 h 29 min	8 h 20 min	8 h 46 min	8 h 20 min	6 h 34 min	6 h 34 min	6 h 34 min	6 h 36 min	6 h 45 min	6 h 45 min				
RDB-Versagen	7 h 17 min	12 h 22 min	12 h 12 min	12 h 10 min	12 h 15 min	12 h 10 min	10 h 3 min	10 h 24 min	10 h 24 min	10 h 21 min	10 h 10 min	10 h 10 min				

9. Empfehlungen für Code-Verbesserungen

Auf Basis der Erfahrungen der Autoren aus der Anwendung von ATHLET-CD innerhalb des Teilprojektes wurden mehrere Codeprobleme wie anomale Programmabbrüche, Transienten mit sehr kleinen Zeitschritten sowie fehlende Modelle für bestimmte Störfallphänomene identifiziert. Die auftretenden Probleme wurden mit den Programmcodeentwicklern (GRS) diskutiert und in /Jobst et al. 2016c; Kliem et al. 2016; Kliem et al. 2017/ dokumentiert. Insgesamt wurden 16 Codeprobleme identifiziert, wovon nachfolgend ausgewählte Probleme kurz dargestellt werden:

- **Probleme mit kleinen Zeitschritten** infolge Strömungssoszillationen innerhalb des Kerns bei der Anwendung der Programmversion ATHLET-CD 3.0B-WASA_BOSS. Der für ATHLET-CD 3.0A entwickelte Eingabedatensatz wurde 2015 auf die im Rahmen des WASA-BOSS-Projektes bereitgestellte Programmversion 3.0B transferiert, womit umfangreiche Testläufe durchgeführt wurden. Die Ursache der kleinen Zeitschritte liegt vermutlich in dem Aufblähen der Hüllrohre und einer Teilblockade der Strömungskanäle begründet. Eine detaillierte Darstellung ist in /Jobst et al. 2016c, Anhang B.2/ enthalten. Gegenwärtig ist dieses Problem nicht gelöst und tritt ebenfalls mit der neuen offiziellen Programmversion ATHLET-CD 3.1 auf. Aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit wurden alle weiteren Simulationen mit der Programmversion ATHLET-CD 3.0A durchgeführt, in welcher dieses Problem kleiner Zeitschrittweiten nicht auftritt.
- **Probleme bei der Kopplung der Programmmodule OREST/FIPISO und AIDA** (relevant für beide Programmversionen ATHLET-CD 3.0A und 3.0B_WASA_BOSS). Der Programmcode berechnet eine kontinuierliche Verlagerung geschmolzenen Materials (Massenverlagerung), jedoch nur eine einmalige Verlagerung der Nachzerfallswärme. Dies führt zu einer zu geringen volumetrischen NZW innerhalb der Schmelze im unteren Plenum und führt zu falschen Schlussfolgerungen bei der Bestimmung des RDB-Versagens. Zur Lösung des Problems wurde ein Workaround gefunden, wobei der zeitliche Verlauf der mit OREST/FIPISO berechneten NZW aus einer vorhergehenden ATHLET-CD-Simulation ohne Kernschmelze ermittelt wird. Dieser Zeitverlauf wird als tabellarische Werte im Eingabedatensatz implementiert und anschließend werden die eigentlichen Kernschmelzszenarien gerechnet. Details sind in /Jobst et al. 2016c, Anhang B.7/ dokumentiert. Dieses von HZDR berichtete Problem konnte in der neuen Programmversion 3.1A behoben werden /Weber 2016/.
- **Anomale Programmabbrüche** traten beispielsweise bei der verzögerten Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher nach Verlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum auf. Das Modul AIDA führte zu einem Konvergenzproblem bei der Berechnung der Temperatur der Kruste oberhalb des Schmelzepools. Folglich konnte diese Notfallmaßnahme mit ATHLET-CD nur

in einem begrenzten Parameterbereich, d. h. vor Verlagerung in das untere Plenum, untersucht werden.

Ein weiteres Problem sind Programmabbrüche infolge zu stark überhitzten Kühlmittels. Dies tritt insbesondere bei Kühlmittleinspeisung in einen bereits teilweise geschmolzenen Kern auf, wobei in einzelne Kontrollvolumen sehr kleine Mengen flüssigen Kühlmittels transportiert werden, die von den heißen Strukturen bzw. der Schmelze einen großen Wärmestrom aufgeprägt bekommen und dabei Temperaturen von 100 K größer der Sättigungstemperatur erreichen („Temperature out of range“). Diese Probleme wurden ebenfalls der GRS berichtet und mit den Programmentwicklern diskutiert.

- **Es sind weitere detaillierte Modelle für mehrere Phänomene schwerer Störfälle notwendig:** z. B. ist in der derzeitigen Programmversion kein Modell für das Versagen der Kerngitterplatte sowie weiterer Strukturen innerhalb des RDB (wie Kernumfassung und Kernbehälter) enthalten. Das Versagen der Kerngitterplatte (z. B. bei Erreichen der Schmelztemperatur von Stahl) führt zu einer unmittelbaren Verlagerung großer Teile des verbleibenden Kerns in das untere Plenum. Derzeit wird im Modell ein wesentlich vereinfachtes Kriterium verwendet: Die Verlagerung wird initialisiert, sobald eine vom Benutzer vorzugebende Schmelzmasse erreicht wird. Dieser vereinfachte Ansatz führt zu einem weiteren Anstieg der Unsicherheiten in den auf die Verlagerung folgenden Prozessen.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Vorhabens wurde ein ATHLET-CD-Eingabedatensatz für einen generischen deutschen DWR vom Typ KONVOI entwickelt. Dabei wurden die Eingabeparameter, die Anfangs- und Randbedingungen aus öffentlich zugänglicher Literatur (sofern möglich), durch eine ingenieurmäßige Bewertung der Gegebenheiten sowie aus der Diskussion mit den Programmcodentwicklern GRS abgeleitet. Das Modell kann für die Simulation von Szenarien schwerer Störfälle aus zwei Störfallkategorien angewandt werden: Station Blackout (SBO) sowie Kühlmittelverluststörfälle (SBLOCA/MBLOCA mit Berücksichtigung des zusätzlichen multiplen Ausfalls von Notkühlsystemen). Die durchgeführten Analysen zeigten dabei die Leistungsfähigkeit des eingesetzten ATHLET-CD-Programmcodes (in der Version 3.0A) zur Simulation der ausgewählten Störfallszenarien für den Zeitbereich zwischen dem einleitenden Ereignis bis hin zum Versagen des Reaktordruckbehälters. Alle wesentlichen Phänomene schwerer Störfälle wurden dabei abgebildet: Beginn der Kernaufheizung, Spaltproduktfreisetzung, Aufschmelzen von Kern-, Struktur-, und Absorbermaterialien, Oxidationsprozesse mit Freisetzung von Wasserstoff, Verlagerung von geschmolzenem Material, Verlagerung in das untere Plenum, Schädigung und Versagen des RDB.

Für ein ausgewähltes Störfallszenario (SBLOCA mit Nichtverfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens und der Nichtverfügbarkeit des Sumpfumwälzbetriebs nach Leerlaufen der Flutbecken) wurden die Ergebnisse von ATHLET-CD mit Ergebnissen einer MELCOR-Rechnung verglichen. Die Analyse zeigte dabei während der frühen Phase der Störfallsequenz eine gute Übereinstimmung der wesentlichen Anlagenparameter, wohingegen für die Spätphase signifikante Unterschiede gefunden wurden, z. B. hinsichtlich des Beginns der Verlagerung in das untere Plenum. Code-zu-Code-Vergleiche sind prinzipiell ein wichtiges Werkzeug für die Verifikation der in den Programmsystemen eingesetzten Modelle und Eingabeparameter, für ein besseres Verständnis bei der Interpretation der Simulationsergebnisse und für die Identifizierung von möglichen Schwachstellen der Programme. Deshalb sind weitere Code-zu-Code-Vergleiche für das beschriebene SBLOCA-Szenario sowie für weitere Störfallszenarien notwendig.

In einem zweiten Schritt wurde das Modell für die Analyse möglicher Notfallmaßnahmen angewandt. Dabei wurden die Zeitverläufe mehrerer Unfallszenarien analysiert und dabei die verbleibenden Zeitspannen für die Einleitung zusätzlicher Maßnahmen (wie z. B. für die Wiederherstellung der Notstromversorgung) ermittelt.

Für den SBO-Störfall wurde die Notfallmaßnahme Primärkreisdruckentlastung (PDE) mit darauf folgender passiver Einspeisung durch die Druckspeicher untersucht. Die Anwendung der Druckentlastung führt zu einem schnellen Absenken des Primärkreisdrucks bis unter den Ansprechdruck der Druckspeicher. Die passive Einspeisung des in den Druckspeichern enthaltenen Kühlmittelinventars führt zum Wieder-

fluten des RDB und einer signifikanten Verzögerung des Beginns der Kernschmelze (etwa 1 ½ h). Weiterhin erfolgen die Schädigung und das Versagen des RDB zeitverzögert (etwa 4 ½ h späteres RDB-Versagen als im Szenario ohne PDE) und bei niedrigem Druck, so dass die Auswirkungen auf das Containment reduziert werden. Die Anwendung der Primärkreisdruckentlastung als alleinige Notfallmaßnahme kann aufgrund des begrenzten Kühlmittelinventars der Druckspeicher den Beginn der Kernschmelze nur verzögern, nicht verhindern. Deshalb wurde als zusätzliche Maßnahme die Kühlmittleinspeisung in den Primärkreis mit Hilfe eines mobilen Pumpensystems untersucht. Dabei wurden der Pumpenförderdruck, die nominale Massenstromrate, der Einspeiseort und die Kriterien für den Beginn der Einspeisung variiert. Dabei wurde mit dem vorliegenden Modell gezeigt, dass ein mobiles Pumpensystem mit einem Förderdruck ≥ 15 bar und einem nominalen Massenstrom von 25 kg/s notwendig ist, um ausreichend Kühlmittel einzuspeisen, so dass eine Aufheizung des Kerns sowie die Freisetzung von Spaltprodukten vermieden werden kann. Erfolgt die Einspeisung erst später unter bereits vorliegender partieller Kernschmelze, so kann das Fortschreiten der Kernschmelze und die Verlagerung von geschmolzenem Material in das untere Plenum nur vermieden werden, sofern die Einspeisung bei maximal 20 t Kernschmelze (12 % des Kerninventars) beginnt. Für einen Einspeisebeginn bei mehr als 20 t Kernschmelze wurde eine Verlagerung von Kernmaterial und nachfolgend das Versagen des RDB ermittelt.

Für ein SBLOCA-Szenario mit nicht verfügbarem sekundärseitigem Abfahren und Versagen des Sumpfpumwälzbetriebs wurde ebenfalls das Einspeisen von Kühlmittel in den Primärkreis mit einem mobilen Pumpensystem untersucht. Es wurde weiterhin untersucht, ob eine zusätzliche Primärkreisdruckentlastung einen positiven Einfluss auf den Verlauf des Störfalls aufweist. Dabei wurde gezeigt, dass die Kombination aus beiden Maßnahmen zur Vermeidung der Spaltproduktfreisetzung führt, sofern beide Maßnahmen spätestens bei Erreichen einer Brennelementaustrittstemperatur von 400 °C eingeleitet werden. Weiterhin wurde gezeigt, dass die verzögerte Einspeisung des sich in den kaltseitigen Druckspeichern befindlichen Kühlmittelinventars zu einer signifikanten Verzögerung der Kernschmelze führt (etwa 1 h 50 min). Zukünftig sollte für SBLOCA-Szenarien die Kombination der beiden Maßnahmen – zeitverzögerte Einspeisung der kaltseitigen Druckspeicher und Einspeisung durch ein mobiles Pumpensystem – untersucht werden. Des Weiteren hängt der Verlauf von Kühlmittelverluststörfällen sehr stark von der Leckgröße, Leckageort und den verfügbaren Notkühlsystemen ab. Deshalb sollten zusätzliche Analysen mit alternativen Leckparametern durchgeführt werden.

Für ein SBO-Szenario mit PDE wurde im Vorhaben eine Unsicherheits- und Sensitivitätsstudie erstellt. Dabei wurde sich auf die frühe Phase der Störfalltransiente bis zum Beginn der Kernschmelze beschränkt. Der Verlauf der Frühphase wird im Wesentlichen durch die Anfangsbedingungen, die freigesetzte Nachzerfallswärmeleistung sowie die Phänomene der Thermohydraulik und des Wärmetransports im Pri-

mär- und Sekundärkreis bestimmt. Die Unsicherheiten dieser Phänomene sind in umfangreichen Experimenten ermittelt worden und relativ gut bekannt und quantifizierbar. Dennoch wurde für den Beginn der Kernschmelze im untersuchten SBO-Szenario bereits ein verhältnismäßig großes Unsicherheitsintervall von etwa 1 h ermittelt (Beginn der Kernschmelze bei $t = 3 \text{ h } 54 \text{ min } \pm 30 \text{ min}$, Zeitintervall für 95%ige Abdeckung bei einer Konfidenz von 95%), wobei die Unsicherheiten in der Bestimmung der Nachzerfallswärme (nach Auswertung von mehreren Literaturquellen zu $\pm 8 \%$ bestimmt) hierfür einen wesentlichen Beitrag liefern. Die sich an die Frühphase anschließende Phase der Kerndegradation schließt eine Vielzahl weiterer physikalischer Phänomene ein: Änderungen in der Geometrie der Brenn- und Steuerstäbe, Oxidation, Schmelzen, Verlagerung und Wiedererstarren von Kernmaterial, Blockadebildung, Verlagerung in das untere Plenum, Wärme- und Stofftransportprozesse im unteren Plenum, Schädigung und Versagen der RDB-Wand. Die Komplexität all dieser physikalischen Phänomene und insbesondere ihre gegenseitige Wechselwirkungen, in der Simulation durch eine Vielzahl von theoretischen Modellen abgebildet, führt zu zusätzlichen Unsicherheiten in der Vorhersage des Störfallverlaufs. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass die Gesamtunsicherheit für die Vorhersage der Ereignisse während der späten In-Vessel-Phase (z. B. RDB-Versagen) nochmals signifikant größer als für den Beginn der Kernschmelze ist. Deshalb sind weitere Arbeiten zur Identifikation und Quantifizierung der die Spätphase bestimmenden Modellparameter sowie der daraus resultierenden Unsicherheiten im zeitlichen Störfallverlauf notwendig. Damit sollen die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der aus den Simulationen abgeleiteten Aussagen für die Spätphase schwerer Störfälle erhöht werden.

Es konnten mehrere ATHLET-CD-Schwachstellen identifiziert und dem Codeentwickler GRS berichtet werden /Kliem et al. 2016; Kliem et al. 2017/. Für die oben beschriebene Zielstellung künftiger Arbeiten zu Unsicherheits- und Sensitivitätsstudien für die Spätphase schwerer Störfälle ist die Gewährleistung einer ausreichenden Codestabilität jedoch zwingend erforderlich.

Des Weiteren muss an dieser Stelle nochmals hervorgehoben werden, dass alle Simulationen mit einem konstanten Containmentdruck von 1 bar gerechnet wurden. Dies ist in Bezug auf die Einspeisung mit mobilen Pumpen als nichtkonservativ anzusehen, da sich durch das Ausströmen von Kühlmittel aus dem Leck oder über die Druckhalterventile der Containmentdruck erhöhen kann (max. 6 bar gegenüber 1 bar im gegenwärtigen Modell). Daraus resultiert ein höherer Primärkreisdruck, der zu einem reduzierten Einspeisemassenstrom führen kann. Weitere Untersuchungen sind hierfür notwendig, beispielsweise mit Implementierung einer szenarioabhängigen Containmentdruckkurve oder die Kopplung des Modells mit einem Modell des Containments (beispielsweise Kopplung von ATHLET-CD mit COCOSYS).

Mit dem vorliegenden Modell wurden die Spaltproduktfreisetzungsraten nur für die Freisetzung aus dem Kern in den Primärkreis untersucht, da die Modellierung des Spaltprodukttransports im Primärkreis und die Austragung in das Containment außerhalb der Zielsetzung von Teilprojekt B lagen. Zukünftige Arbeiten sollten deshalb eine tiefergehende Analyse der Spaltproduktfreisetzung und des Spaltprodukttransports innerhalb des Primärkreises sowie im Containment zum Gegenstand haben, um den für die Umgebung einer Anlage im Falle eines schweren Störfalls maßgeblichen Quellterm zu quantifizieren.

11. Literatur

- Albert Ziegler GmbH: *PFPN 10-1000/10-1500 ULTRA Power 4*. 2015; Available from: <http://www.ziegler.de/de/produkte/pumpen>.
- AREVA: *UK-EPR - Fundamental Safety Overview, Volume 2: Design and Safety Report, Chapter B: Introduction and General Description of the Plant*, AREVA Nuclear Communications, 2007.
- Asfia, F.; Dhir, V.: *Natural convection heat transfer in volumetrically heated spherical pools*. in *Proc. DECD/CSNI/NEA Workshop on Large Molten Pool Heat Transfer*. 1994.
- Austregesilo, H.: *Personal communication*, 2015.
- Austregesilo, H.; Bals, C.; Hollands, T.; Köllein, C.; Luther, W.; Schubert, J.-D.; Trambauer, K.; Weber, S.: *ATHLET-CD Mod 3.0 Cycle A - User's Manual*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2013.
- Austregesilo, H.; Bals, C.; Hollands, T.; Luther, W.; Schubert, J.-D.; Trambauer, K.; Weber, S.: *ATHLET-CD Mod 3.0 Cycle B - User's Manual*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2014.
- Austregesilo, H.; Bals, C.; Hora, A.; Lerchl, G.; Romstedt, P.; Schöffel, P.; von der Cron, D.; Weyermann, F.: *ATHLET Mod 3.0 Cycle A - Models and Methods*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2012.
- Austregesilo, H.; Bals, C.; Trambauer, K.: *Post-test calculation and uncertainty analysis of the experiment QUENCH-07 with the system code ATHLET-CD*. Nuclear Engineering and Design, 2007. 237(15-17): S. 1693-1703.
- Bals, C.; Köllein, C.; Cester, F.; Hollands, T.; Luther, W.; Schubert, J. D.; Weber, S.: *Entwicklung von Kühlkreislaufmodellen zur Spätphase von Kernschmelzeunfällen (ATHLET-CD und ASTEC) Abschlussbericht; Reaktorsicherheitsforschung-Vorhabens Nr. RS1187, GRS-A-3646*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- Brockmeier, U.: *Modellbasis der Störfallanalyseprogramme ATHLET/CD, ICARE2, MELCOR und SCDAP/RELAP5, Statusbericht*, EUR 16937 DE/EN, Ruhruniversität Bochum, Institut für Energietechnik, Luxembourg, 1996.
- Buck, M.; Trometer, A.; Wilhelm, P.; Jobst, M.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Hollands, T.; Di Marcello, V.; Sanchez, V.; Gehr, R.: *Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes - Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: Meilensteinbericht M43 – Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen (in Erstellung)*, IKE2-168, Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, 2017.
- Denman, M. R.; Brooks, D. M.: *Fukushima Daiichi Unit 1 Uncertainty Analysis- Exploration of Core Melt Progression Uncertain Parameters-Volume II*, Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2015.

- Eisert, P.; Gruner, P.; Kuntze, W. M.: *Estimation of PWR lower head failure times using the method ASTOR*. in *Transactions of the 12th international conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT). Volume L: Inelastic behaviour of solids and structures*. 1993.
- England, T.; Wilson, W.; Schenter, R.; Mann, F.: *Summary of ENDF/BV data for fission products and actinides. Final report*, Los Alamos National Lab., NM (USA), 1984.
- Gehr, R.; Allelein, H.-J.; Kretzschmar, F.; Bratfisch, C.; Jobst, M.; Kliem, S.; Wilhelm, A. N.; Buck, M.; Hollands, T.; Sanchez, V.; Imke, U.; Di Marcello, V.; Cheng, X.: *Executive Summary of the joint research project: Advancement and Application of Severe Accident Codes – Evaluation and Optimization of Accident Management Measures (in Erstellung)*, 2017.
- Gesellschaft für Reaktorsicherheit: *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke: Phase B eine Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie*, Verl. TÜV Rheinland, Köln, 1990.
- GKN: *Sicherheitsüberprüfung europäischer Kernkraftwerke vor dem Hintergrund des schweren Erdbebens und Tsunamis in Japan am 11. März 2011: Standortbericht des Betreibers für den Standort Neckarwestheim [GKN] - Abschlussbericht*, EnBW Kernkraft GmbH, 2011.
- GRS: *German PWR Sample Input for ATHLET MOD3.0 - Cycle A*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2012.
- GRS: *ATHLET 3.1A, Program Updates since Mod 3.0 Cycle A*, 2016.
- Hesse, U.; Denk, W.; Deitenbeck, H.: *OREST - Eine direkte Kopplung von HAMMER und ORIGEN zur Abbrandsimulation von LWR- Brennstoffen*, GRS-63, 1993.
- Hollands, T.: *Personal communication*, 2015.
- Ilg, U.; König, G.; Erve, M.: *Das Werkstoffkonzept in deutschen Leichtwasserreaktoren-Beitrag zur Anlagensicherheit*. Wirtschaftlichkeit und Schadensvorsorge. atw, 2008. 53: S. 766-781.
- Jobst, M.; Tusheva, P.: *Database of Generic German PWR KONVOI reactor and description of ATHLET-CD model. Internal HZDR report.*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2015.
- Jobst, M.; Wilhelm, P.; Kliem, S.: *ATHLET-CD application for severe accidents analysis of generic KONVOI PWR*. in *International User Meeting ATHLET and ATHLET-CD*. 2016a. Garching.
- Jobst, M.; Wilhelm, P.; Kliem, S.: *Application of ATHLET-CD code for simulation of SBLOCA 50 cm² severe accident scenario for a generic German PWR (eingereicht)*. in *8th European Review Meeting on Severe Accident Research*. 2017a. Warsaw.

- Jobst, M.; Wilhelm, P.; Kliem, S.; Kozmenkov, Y.: *Application of the Severe Accident Code ATHLET-CD. Coolant injection to primary circuit of a PWR by mobile pump system in case of SBLOCA severe accident scenario*. Institute of Resource Ecology, Annual Report 2016, 2017b.
- Jobst, M.; Wilhelm, P.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: Jahresbericht 2015*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2016b.
- Jobst, M.; Wilhelm, P.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Trometer, A.; Buck, M.; Kretzschmar, F.; Dietrich, P.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: Meilensteinbericht M35 – Simulation postulierter schwerer Störfälle in deutschen DWR*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2016c.
- Kelkar, K. M.; Khankari, K. K.; Patankar, S. V.: *Computational modeling of turbulent natural convection in flows simulating reactor core melt*. Innovative Research Inc., Final Report Submitted to SNL, Albuquerque, NM, 1993. 87115.
- Kennard, M.; Harbottle, J.: *LWR control assembly designs: A historical perspective*, 2000.
- Kleinedler, M.: *Ereignisabläufe in Kernkraftwerken (DWR)*, VGB PowerTech Service GmbH Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2002.
- Kliem, S.; Hoffmann, A.; Jobst, M.; Kozmenkov, Y.; Schäfer, F.; Wilhelm, P.: *Activity report on the use of GRS codes in the year 2015*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 2016.
- Kliem, S.; Hoffmann, A.; Jobst, M.; Kozmenkov, Y.; Wilhelm, P.: *Activity report on the use of GRS codes in the year 2016*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2017.
- Kozmenkov, Y.; Jobst, M.; Kliem, S.; Schäfer, F.; Wilhelm, P.: *Statistical Analysis of the Early Phase of SBO Accident for PWR*. Nuclear Engineering and Design, 2017. 314: S. 131-141.
- Kronenberg, J.: *Simulation des Kernschmelzens in Leichtwasserreaktoren*, IKE, Stuttgart, 2001.
- Lerchl, G.; Austregesilo, H.; Schöffel, P.; von der Cron, D.; Weyermann, F.: *ATHLET Mod 3.0 Cycle A User's manual*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS), 2012.
- Lorenz, R. A.; Osborne, M. F.: *A summary of ORNL fission product release tests with recommended release rates and diffusion coefficients*, Nuclear Regulatory Commission, 1995.
- Neeb, K.-H.: *The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors*, Walter de Gruyter, 1997.

- Pohlner, G.; Trometer, A.; Buck, M.; Schäfer, F.; Tusheva, P.; Di Marcello, V.; Imke, U.; Sanchez, V.; Cheng, X.; Kretzschmar, F.; Dietrich, P.; Gehr, R.: *Störfallmaßnahmen zur Milderung der Folgen von Reaktorunfällen mit schweren Kernschäden*, IKE 2-163, University of Stuttgart, Institute of Nuclear Technology and Energy Systems, 2014.
- RSK: *RSK-Empfehlung, Anforderungen an die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen*, 385. RSK-Sitzung (20./21. 07. 2005), 2005.
- Schäfer, F.; Tusheva, P.; Kozmenkov, Y.; Jobst, M.; Kliem, S.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen Jahresbericht 2014*, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2014a.
- Schäfer, F.; Tusheva, P.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: LOCA50 – Sensitivity simulations with ATHLET Mod 3.0 Cycle A*, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2014b.
- Schäfer, F.; Tusheva, P.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Hollands, T.; Buck, M.; Trometer, A.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: ATHLET-CD model for a generic KONVOI reactor and test simulations for selected SBO and SBLOCA scenarios*, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2014c.
- Schimpfke, A.; Bachmann, J.; Sievers, J.: *Verformung der RDB-Bodenkalotte und Bestimmung von Versagensort und -zeitpunkt*, GRS-A-2932, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, 2001.
- Semeria, R.; Martinet, B.: *Calefaction spots on a heating wall: Temperature distribution and resorption*. Proc. Inst. Mech. Eng. (London), 180: Pt 3C, 192-205(1965-66). 1967.
- Trambauer, K.; Austregesilo, H.; Bals, C.; Cester, F.; Deitenbeck, H.; Hora, A.; Lerchl, G.; Schubert, J. D.; Voggenberger, T.: *Weiterentwicklung des Rechenprogrammsystems ATHLET/ATHLET-CD*, GRS-A-3215, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2004.
- Trambauer, K.; Austregesilo, H.; Bals, C.; Cester, F.; Deitenbeck, H.; Klein-Heßling, W.; Lerchl, G.; Müller, C.; Papukchiev, A.; Schubert, J.-D.: *Weiterentwicklung ATHLET / ATHLET-CD Vorhaben RS 1162 Abschlussbericht*, GRS-A-3461, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2009.
- Trometer, A.; Pohlner, G.; Buck, M.; Tusheva, P.; Schäfer, F.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Di Marcello, V.; Imke, U.; Sanchez, V.: *Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes - Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: Meilensteinbericht M42 Zwischenergebnisse zu Störfalluntersuchungen*, 2015.

- Tusheva, P.; Kozmenkov, Y.; Schäfer, F.; Kliem, S.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen HLLOCA200 – Comparison between three simulations*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2013.
- Tusheva, P.; Schäfer, F.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Hollands, T.; Trometer, A.; Buck, M.: *WASA-BOSS: ATHLET-CD Model for Severe Accident Analysis for a Generic KONVOI Reactor*. in *46th Annual Meeting on Nuclear Technology 2015a*.
- Tusheva, P.; Schäfer, F.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Hollands, T.; Trometer, A.; Buck, M.: *WASA-BOSS: ATHLET-CD Model for Severe Accident Analysis for a Generic KONVOI Reactor*. *Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie*, 2015b. 60(7): S. 442-447.
- Tusheva, P.; Schäfer, F.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.; Hollands, T.; Trometer, A.; Pohlner, G.; Buck, M.: *Milestone Report M32: Simulation postulierter Störfälle / Unfälle in deutschen Anlagen - Simulation of postulated accidents / severe accidents in German NPPs*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2014.
- Weber, S.: *Personal communication*, 2016.
- Weber, S.; Austregesilo, H.; Bals, C.; Band, S.; Hollands, T.; Köllein, C.; Lovasz, L.; Pandazis, P.; Schubert, J. D.; Sonnenkalb, M.: *Weiterentwicklung des Rechenprogramms ATHLET-CD*, GRS-445, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2016.
- Weber, S.; Köllein, C.; Austregesilo, H.: *ATHLET-CD Schulungsmaterial, AIDA*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, 2014.
- Wilhelm, P.; Jobst, M.; Kliem, S.; Kozmenkov, Y.; Schäfer, F.: *Application of Severe Accident Code ATHLET-CD. Modelling, Evaluation and Optimization of Accident Management Measures (Project WASA-BOSS)*. Institute of Resource Ecology, Annual Report 2015, 2016a.
- Wilhelm, P.; Jobst, M.; Kozmenkov, Y.; Kliem, S.: *WASA-BOSS Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen: Milestone Report M-B2 – Assessment and Optimization of Accident Management Measures*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, 2016b.
- Wilhelm, P.; Jobst, M.; Schafer, F.; Kliem, S.: *Severe accident research activities at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)*. *Kerntechnik*, 2016c. 81(2): S. 134-137.
- Yamanouchi, A.: *Effects of Core Spray Cooling at Stationary State after Loss of Coolant Accident*. *Journal of Nuclear Science and Technology-Tokyo*, 1968. 5(11): S. 547-558.
- Ziegler, A.; Allelein, H.-J.: *Reaktortechnik: Physikalisch-technische Grundlagen*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

Danksagung

Die Autoren danken dem Projektträger PTKA-WTE für die sachkundige Begleitung des Vorhabens, den ATHLET- und ATHLET-CD-Programmentwicklern für die wertvollen wissenschaftlichen Diskussionen und Unterstützung bei der Erstellung des Eingabedatensatzes, den Projektpartnern im Verbundvorhaben, insbesondere IKE (für die Beiträge und Diskussionen zum Eingabedatensatz) und KIT (für die MEL-COR-Simulationen). Ein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Dr. Frank Schäfer für seine wertvollen Beiträge im Rahmen der Projektbearbeitung.



Bautzner Landstr. 400
01328 Dresden, Germany
Tel. +49 351 260-2318
Fax +49 351 260-12318
s.kliem@hzdr.de
<http://www.hzdr.de>