

**Kontamination
und berufliche
Strahlenexposition
in KKW mit
Druckwasserreaktoren**

Kontamination und berufliche Strahlenexposition in KKW mit Druckwasserreaktoren

Sebastian Schneider
Gerd Bruhn
Andreas Artmann
Florence-Nathalie Sentuc
Olga Tiessen

Dezember 2017

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 3616S72374 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Abbau, berufliche Strahlenexposition, 3D-Modell, Kontamination, Revision, Stilllegung, Simulation, Systemdekontamination, Tätigkeiten, Tätigkeitsdosis

Kurzfassung

Im Vorläufervorhaben zu dieser Studie wurde eine Simulationskette, bestehend aus einem 3D-CAD-Modell, einer mathematischen Methode zur Koordinatentransformation, dem Programm MicroShield sowie einem empirischen Tätigkeitsmodell entwickelt, welche die Strahlenexposition des Personals für definierbare Tätigkeiten am Primärkreislauf berechnen kann. Diese wurde für DWR der zweiten und dritten KWU-/Siemens-Generation anhand von Revisionstätigkeiten validiert, so dass die Eignung des Werkzeugs für Prognosen der Strahlenexposition gezeigt werden konnte. Als relevante Quellen innerhalb des Primärkreislaufs werden anhaftende Kontaminationen angesehen, wohingegen aktivierte kernnahe Strukturen vernachlässigt wurden. In dieser Studie wurde das Modell um DWR der sogenannten Konvoi-Generation erweitert, welche sich in der Materialwahl und mithin in den relevanten Nuklidvektoren von älteren Anlagen unterscheiden. Durch eine Anlagenbesichtigung und Gespräche mit Mitarbeitern der Anlage konnte das Modell entsprechend angepasst werden. Das Radionuklid Kobalt-60 ist zwar weniger bedeutend als in älteren Anlagentypen, aber dennoch weiterhin das dominierende Nuklid in Anlagen der vierten KWU-/Siemens-Generation, so dass es als Leitnuklid herangezogen wird. Auf Grund der zeitnah geplanten endgültigen Abschaltung (auch) der drei deutschen Konvoi-Anlagen, wurden Abbautätigkeiten in den Fokus der Simulationen gesetzt und diese sowohl für Konvoi-Anlagen also auch für Anlagen der älteren Generationen zwei und drei durchgeführt und miteinander verglichen. Des Weiteren wurde durch gegenüberstellende Simulationen die Frage beantwortet, ob eine Primärkreisdekontamination vor dem Abbau in Konvoi-Anlagen aus Strahlenschutz-Sicht einen Nutzen bringt, der diese Maßnahme rechtfertigt. Die ermittelte Dosisersparung beim Abbau von Dampferzeugern ist durch die Dekontamination erheblich. Ein Verzicht auf eine Dekontamination an dieser Stelle würde zu Dosiswerten führen, die noch weit oberhalb der Tätigkeitsdosis des Personals beim Dampferzeuger-Abbau in einer dekontaminierten Generation-2-Anlage liegen.

Abstract

In the precursor project of this study a simulation procedure was developed, consisting of a 3D-CAD model, a mathematical method for coordinate transformation, the software MicroShield and an empiric job model, to calculate the occupational exposure for definable jobs at the primary circuit. It was validated for inspection and maintenance jobs at PWRs of the second and third KWU/Siemens generation. With that the aptitude of this tool for prognosis of radiation exposure was demonstrated. Adhering contaminations within the primary circuit are considered as relevant sources, whereas activated core-near components are neglected. In this study, the model was extended by PWR of the so-called Convoy generation, which differ from older plants in the material composition and consequently in the relevant nuclide vectors. With information from a visit at a nuclear power plant und conversation with the staff, the model could be adjusted appropriately. The radionuclide Cobalt-60 is indeed less important compared to older plant-types, but it is still the dominant nuclide in facilities of the fourth KWU/Siemens generation, so that it is used as reference nuclide. Due to the contemporary planned final shut-down of the three Convoy plants (besides other), dismantling work was set into focus of simulation. Simulation was conducted and results compared for Convoy plants and for plants of the older generations two and three. Furthermore, by comparative simulations the question was answered if full system decontamination in Convoy plants before dismantling lead to benefits that justify this measure. The determined dose saving during unmounting works at the steam generators caused by the decontamination is remarkable. An abdication of decontamination at this location would lead to doses much higher than the occupational job dose during steam generator dismantling in a decontaminated generation 2 facility.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract	II
1	Einleitung	1
2	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Vorläufervorhaben	5
2.1	Schlussfolgerungen für diese Studie.....	7
3	Neue Erkenntnisse aus aktuellen Messdaten, Literatur und persönlicher Kommunikation	9
3.1	Erkenntnisse aus internationaler Literatur.....	9
3.2	Erkenntnisse aus Anlagenbesuchen aus anderen Vorhaben	10
3.3	Nutzbare Erkenntnisse aus dem internationalen ISOE-Symposium 2016	11
3.3.1	Vorträge und Poster.....	12
3.3.2	Auswertung von Erfahrungsberichten	13
3.4	Umfangreiche Tätigkeiten / Abbautätigkeiten.....	14
3.5	Neue Erkenntnisse zum Primärkreislaufdekontaminationsverfahren ASDOC_D /KEM 17/.....	16
3.6	Erkenntnisse aus der Anlagenbesichtigung eines Konvoi-Kraftwerkes	18
4	Modifikationen/ Erweiterungen der Simulationskette	23
4.1	Modifikation des Nuklidvektors für Anlagen vom Typ Konvoi	23
4.2	Modifikation des Nuklidvektors für Rückbautätigkeiten bei Anlagen der 2. und 3. Generation KWU/Siemens	26
4.2.1	Modifikation des Nuklidvektors für Rückbautätigkeiten bei Anlagen der 2. Generation KWU/Siemens.....	27
4.2.2	Modifikation des Nuklidvektors für Rückbautätigkeiten bei Anlagen der 3. Generation KWU/Siemens.....	28
4.3	Abbildung von dosisintensiven Tätigkeiten in Ortsdosisleistungsfeldern auf das generische Modell	28

4.3.1	Ausbau eines Dampferzeugers als Großkomponente	29
4.3.2	Abbau der Hauptkühlmittelpumpen	34
5	Ergebnisse und Diskussion der Simulationen	39
5.1	Simulation von Revisionstätigkeiten in Konvoi-Anlagen	39
5.1.1	Simulation von Tätigkeiten an der HKMP	39
5.1.2	Simulation der Tätigkeiten am Druckhalter.....	40
5.1.3	Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger	42
5.1.4	Diskussion der Simulationsergebnisse für Revisionstätigkeiten in Konvoi-Anlagen	44
5.2	Simulation der Stilllegungstätigkeit „DE-Abbau“	46
5.2.1	DE-Abbau in Anlagen der zweiten KWU/Siemens-Generation.....	47
5.2.2	DE-Abbau in Anlagen der dritten KWU/Siemens-Generation	48
5.2.3	DE-Abbau in Anlagen der vierten KWU/Siemens-Generation (Konvoi)	49
5.2.4	Diskussion der Simulationsergebnisse zum Abbau von Dampferzeugern	53
5.3	Simulation der Stilllegungstätigkeit „HKMP-Abbau“	56
5.3.1	HKMP-Abbau in Anlagen der zweiten KWU/Siemens-Generation	56
5.3.2	HKMP-Abbau in Anlagen der dritten KWU/Siemens-Generation.....	57
5.3.3	HKMP-Abbau in Anlagen der vierten KWU/Siemens-Generation	58
5.3.4	Diskussion der Simulationsergebnisse zum HKMP-Abbau	60
6	Zusammenfassung	63
	Literaturverzeichnis.....	65
	Abbildungsverzeichnis.....	67
	Tabellenverzeichnis.....	69
	Abkürzungsverzeichnis.....	71

1 Einleitung

Die Strahlenexposition des Personals in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren (DWR) wird von den lokalen Ortsdosisleistungen und dem individuellen Tätigkeits- und Bewegungsprofil bestimmt. Die Ortsdosisleistungen setzen sich aus Beiträgen durch aktivierte Komponenten und durch Kontaminationen zusammen. In dieser Studie werden Tätigkeiten und Situationen betrachtet, in denen die Beiträge aus aktivierten Komponenten sowie Neutronenstrahlung keine Rolle spielen, sondern ausschließlich die durch Kontamination von Komponenten und Systemen.

Im Zuge der technischen Weiterentwicklung von Kernkraftwerken in Deutschland, insbesondere durch die Kraftwerkunion (KWU) bzw. Siemens, wurden die durch Kontamination hervorgerufenen Ortsdosisleistungen von Anlagengeneration zu Anlagengeneration deutlich reduziert. Dies begründet sich durch eine veränderte Kühlmittelchemie, die Verwendung anderer Werkstoffe mit geänderter Zusammensetzung für Systeme und Komponenten und durch verstärkte passive Maßnahmen zur Abschirmung. Demgegenüber haben sich die Tätigkeiten während der Revisionen zwischen den Anlagengenerationen nur unwesentlich verändert. Eine Ausnahme bilden Sichtprüfungen vor Ort, die in Konvoi-Anlagen auf Grund niedriger Ortsdosisleistungen auch während des Leistungsbetriebes durchgeführt werden können. In den Anlagen der Vorgängergenerationen von KWU/Siemens DWR sind viele der dabei aufzusuchenden Orte in diesem Fall nicht begehbar.

Ein wesentlicher Unterschied von KWU/Siemens-DWR der vierten Generation (im Folgenden Konvoi-Anlagen genannt) zu ihren Vorläufern ist die Verwendung von weitgehend Stellite-freien Komponenten und Systemen ab dem ersten Betriebszyklus. Stellite sind kobalthaltige Legierungen, die aufgrund ihrer gewünschten mechanischen Eigenschaften auch in Kernkraftwerken eingesetzt wurden. Durch Korrosion und Transport über das Kühlmittel werden kobalthaltige Metalloxide, die sich an den Oberflächen Stellite-haltiger Komponenten bilden, auch in die Kernzone des Reaktors gebracht und das stabile ^{59}Co wird dort durch Neutroneneinfang zu ^{60}Co aktiviert. Das ^{60}Co weist beim Zerfall hohe Gamma-Energien auf und hat eine Halbwertszeit von 5,27 Jahren. Es ist in der Mehrzahl der Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren das radiologisch bedeutendste Radionuklid. Bei der Stilllegung von DWR älterer Bauart (z. B. Generation 2 von KWU/Siemens) dient ^{60}Co als Leitnuklid bei der radiologischen Charakterisierung.

Liegt bauartbedingt ^{60}Co nur in niedrigen Konzentrationen im Kühlmittel vor, gilt dies mit großer Wahrscheinlichkeit auch für Ablagerungen und Anhaftungen auf den inneren Oberflächen von Komponenten und Systemen des Primärkreislaufes. Dadurch ergeben sich neue Fragestellungen bei Konvoi-Anlagen:

- Kann ^{60}Co auch in Konvoi-Anlagen als Leitnuklid bei der radiologischen Charakterisierung fungieren, insbesondere einige Halbwertszeiten (5 – 15 Jahre) nach der letzten Abschaltung und vor bzw. während des Abbaus?
- Welches alternative Leitnuklid könnte ggfs. stattdessen verwendet werden?
- Wenn es im Primärkreislauf von Konvoi-Anlagen Punkte mit deutlich erhöhter Aktivität (sogenannte Hot-Spots) gibt, welche Nuklide sind dann für die Generierung von Ortsdosisleistungen hauptverantwortlich?
- Ist eine Systemdekontamination (engl. „Full System Decontamination“ – FSD) des gesamten Primärkreislaufs mit dem Ziel, die Ortsdosisleistung beim Leistungsbetrieb, im Nachbetrieb und beim Abbau zu minimieren, angesichts bereits niedriger Ortsdosisleistungen zielführend?
- Falls ja, ist die Anwendung etablierter Dekontaminationsverfahren, die das Ziel haben möglichst ^{60}Co -haltige Metalloxide zu entfernen, weiterhin effektiv und sinnvoll?

Als Konsequenz aus dem veränderten Nuklidvektor, ergeben sich außerdem weitere Fragen:

- Wie unterscheiden sich die Tätigkeiten des Personals im Betrieb, in Revisionen und beim Abbau im Vergleich zu Anlagen älterer Bauart hinsichtlich der passiven Strahlenschutzvorkehrungen und des Arbeitsablaufes?
- Kann ggfs. auf fernhantiertes Arbeiten in Revisionen oder beim späteren Abbau verzichtet werden?

Die Erörterung dieser Fragen wird in dieser Studie angegangen. Zunächst werden aktuelle Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzbeiträge insbesondere mit Blick auf die Kontaminationsproblematik ausgewertet. Mit Hilfe eines Anlagenbesuches bei einer Konvoi-Anlage sollen gegebenenfalls noch fehlende Erkenntnisse ergänzt werden und typische Ortsdosisleistungswerte ermittelt werden. Auf dieser Basis wird das im Vorläufer-Vorhaben erstellte Modell eines generischen Druckwasserreaktors für Konvoi-Anlagen weiter verfeinert und optimiert. Mit dem verfeinerten Modell werden

anschließend Simulationen zu Tätigkeiten in Konvoi-Anlagen durchgeführt. Hierfür werden zunächst die im Vorläufervorhaben behandelten Tätigkeiten (Inspektion/Wartung Hauptkühlmittelpumpe, Tätigkeiten am Druckhalter und Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger) simuliert und die ermittelten Personendosen ausgewertet. Die Auswirkung einer möglichen Systemdekontamination auf die Strahlenexpositionen in Folge der o. g. Tätigkeiten werden diskutiert und entsprechende Simulationen durchgeführt. Des Weiteren werden Simulationen zu typischen Tätigkeiten bei der Stilllegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor durchgeführt. In jüngeren Stilllegungsprojekten in Deutschland wurde vor Beginn der Abbaumaßnahmen stets eine Systemdekontamination durchgeführt, so dass dies den typischen Zustand vor dem Abbau darstellt. Ausgewählte Stilllegungstätigkeiten werden für DWR der KWU/Siemens-Generationen 2, 3 und 4 simuliert.

2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Vorläufer- vorhaben

Im Rahmen des Vorläufervorhabens (3612S70025 /GRS 16/) wurde ein generisches Modell eines Druckwasserreaktor-Primärkreislaufes erstellt, welches geometrisch 4-Loop-Anlagen der deutschen Kraftwerkunion (KWU) bzw. Siemens aus deren Generationen 2, 3 und 4 repräsentiert. Bei Unterschieden zwischen den Generationen wurde im zugehörigen 3D-Modell entweder gemittelt (z. B. Druckhalter) oder der am häufigsten anzutreffende Fall berücksichtigt (z. B. Hauptkühlmittelpumpen). Die Unterschiede innerhalb der ca. 1200-MW-Leistungsklasse wurden als gering erachtet und damit gerechtfertigt, nur *ein* generisches 3D-Modell für alle Anlagengenerationen einzusetzen. Die Variationen wurden auf dieser Grundlage durch Verwendung von unterschiedlichen Nuklidvektoren für die jeweiligen Generationen, durch entsprechende Materialwahl der Komponenten und durch Anpassung der Abschirmungsstärken in der Simulationssoftware MicroShield /GRO 15/ realisiert.

Die Nuklidvektoren wurden für die Anlagengenerationen (2, 3 und 4) und für die wesentlichen Systeme und Komponenten (7 verschiedene, davon 5 weiter betrachtet) des Primärkreislaufes einzeln spezifiziert, so dass sich insgesamt 15 Nuklidvektoren ergaben. Diese repräsentierten den Zustand „Revision“ mit entleerten Systemen. Hierfür wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Auswertung der Daten zur Kühlmittelaktivität (ISOE¹-Daten), Ermittlung welche Nuklide relevant sind und in welchem Größenverhältnis diese zueinander stehen (qualitativer Nuklidvektor), Aufteilung nach Anlagengeneration.
- Reduzierung der Radionuklide auf aktivierte Metalloxide, welche sich als Kontamination in Primärkreislauf ablagern.
- Auswertung und Mittelung von gemessenen Ortsdosisleistungen (ODL) während Revisionen (Hauptkühlmittelleitung heiß/kalt und Dampferzeuger-Wasserkammer) bei deutschen KWU/Siemens-Anlagen aus den Jahren 1997 bis 2011.

¹ Information System On Occupational Exposure

- Ergänzung um weitere ODL-Messwerte, die aus Präsentationen, Konferenzbeiträgen und Anlagenbesichtigungen (2. und 3. Generation) in Erfahrung gebracht wurden.
- Rücksimulation mit MicroShield um systemspezifische Flächenaktivitäten zu ermitteln. Dabei wurden die Radionuklidverhältnisse aus der Kühlmittelauswertung beibehalten.
- Abschätzung von Aktivitätskonzentrationen in den übrigen Komponenten und Systemen, die nicht anderweitig ermittelt werden konnten. Dazu wurden Literaturdaten und eine insgesamt in Primärkreislauf vorhandene Aktivität von 1 bis 2 E14 Bq herangezogen.

Zusätzlich wurde die Situation nach einer Systemdekontamination durch entsprechende Anpassungen dieser Nuklidvektoren abgebildet, so dass weitere 15 Nuklidvektoren ermittelt wurden. Als Dekontfaktoren (DF) dienen Mittelwerte aus in Deutschland erfolgten Systemdekontaminationen, die komponentenspezifisch, aber auf alle Nuklide gleichermaßen angewendet wurden. Die real durchgeführten Systemdekontaminationen erfolgten in Anlagen der ersten, zweiten und dritten Generation von KWU/Siemens-DWR.

Mit dem 3D-Modell und den Nuklidvektoren für alle relevanten Systeme und Komponenten lässt sich unter Verwendung des Programms MicroShield für jeden Punkt in der Umgebung des Primärkreislaufs eine Ortsdosisleistung berechnen. Hierzu wurden Methoden der analytischen Geometrie zur Koordinatentransformation zwischen dem 3D-Zeichenprogramm (Sketchup) und MicroShield erarbeitet und angewandt.

Um Tätigkeiten während der Revisionen zu simulieren und zugehörige Personendosen ermitteln zu können, wurden einfache Modelle für ausgewählte Tätigkeiten erstellt. Die Anzahl der beteiligten Personen bei diesen Tätigkeiten und deren Gesamt-Arbeitszeit konnte aus ISOE-Daten entnommen werden. Repräsentative Aufenthaltspunkte wurden auf Basis von Erkenntnissen durch Anlagenbesichtigungen und Befragungen des dortigen Strahlenschutz-Personals festgelegt.

Unter Anwendung der vollständigen Simulationskette konnten Tätigkeitsdosen für häufig durchgeführte Tätigkeiten am Primärkreislauf mit und ohne Systemdekontamination berechnet werden. Dies wurde für Anlagen der zweiten und dritten KWU/Siemens-Anlagen-Generation durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit Messdaten (ISOE, RSK-Berichte) verglichen. Simulierte und gemessene Daten stimmen innerhalb der Schwankungsbreiten der Messungen und des Vertrauensbereichs der Simulationen (ca. Faktor 2,5) überein.

2.1 Schlussfolgerungen für diese Studie

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, basiert ein Großteil der Parameterwahl in der generischen Modellkette eines Druckwasserreaktors auf technischen Daten, Messwerten und persönlichen Informationen, die von oder aus KKW der zweiten oder dritten Generation von KWU/Siemens gewonnen wurden. Es ist daher zu prüfen, an welchen Stellen in diesem Vorhaben eine Fokussierung allein auf Konvoi-Daten sinnvoll oder gar notwendig ist und an welchen Stellen das bisherige Modell unverändert übernommen werden kann.

Zur Laufzeit des Vorgängervorhabens konnte noch nicht in Erfahrung gebracht werden, welche ODLen an bestimmten Stellen des Primärkreislaufs in Anlagen der vierten Generation typischerweise gemessen werden (abgesehen von den regelmäßig bei Revisionen zu messenden ODL-Werten), so dass hierfür keine entsprechenden Rücksimulationen durchgeführt werden konnten. Die für die einzelnen Systeme und Komponenten bestimmten Nuklidvektoren waren daher mit einer deutlich größeren Unsicherheit behaftet als bei den Anlagen der zweiten und dritten Generation, bei denen eine entsprechende punktuelle Rücksimulation erfolgte. Auf Simulationen für den Konvoi-Typ wurde daher verzichtet.

Für den radiologischen Zustand nach einer Systemdekontamination wurde für Anlagen aller Generationen angenommen, dass sich die System- und komponentenspezifischen Dekontfaktoren (DF) bei allen Generationen gleichermaßen einstellen. Die real eingesetzten Verfahren zur Dekontamination sind alle wesentlich auf die Entfernung von ^{60}Co bzw. dessen Oxide optimiert. Die resultierenden DFen beruhen zum Teil auf den durch das Entfernen von ^{60}Co resultierenden gesunkenen ODLen (und nicht immer auf dem Aktivitätenverhältnis). Es ist daher fraglich, ob in einer Konvoi-Anlage, die dieses Radionuklid kaum mehr enthält, ein solcher Dekontfaktor überhaupt zustande kommen kann und ob sich deshalb die Ergebnisse der Systemdekontamination von Anlagen älterer Bauart auf Konvoi-Anlagen übertragen lassen.

Beide o. g. Fragestellungen betreffen die Nuklidvektoren, welche auf Basis neuer Erkenntnisse aus Fachliteratur, bei Konferenzen und bei Anlagenbesuchen verfeinert werden sollten.

Auf Grund des allgemein geringeren Radioaktivitätsniveaus in Konvoi-Anlagen ist es denkbar, dass Tätigkeiten auch anders ausgeführt werden können als in älteren Anlagen. Auch bestimmte Tätigkeiten während des Leistungsbetriebes sind möglich. Die bereits definierten Tätigkeitsprofile sind deshalb noch einmal zu prüfen und ggfs. zu ändern oder zu erweitern.

Da sich die im Vorläufervorhaben erstellten Simulationswerkzeuge als brauchbar erwiesen haben, können nun weitergehende Simulationen durchgeführt werden, denen eine weniger breite oder gar keine Datengrundlage zur Verifikation beiseite steht. Als solche können insbesondere Abbautätigkeiten im Rahmen der Stilllegung aufgefasst werden, die bislang in Anlagengenerationen zwei bis vier noch nicht durchgeführt wurden. Das generische Modell kommt damit als Prognosetool zur Ermittlung von tätigkeitsbezogenen Personendosen zum Einsatz.

3 Neue Erkenntnisse aus aktuellen Messdaten, Literatur und persönlicher Kommunikation

Die Literaturrecherche im Vorläufervorhaben wurde im ersten Quartal 2013 abgeschlossen. Deshalb wurden neue Beiträge aus Konferenzen, in Veröffentlichungen und neuere Daten aus der ISOE-Datenbank ab diesem Zeitpunkt auf Verwertbarkeit für die Optimierung des generischen Modells eines Konvoi-Primärkreislaufes hin untersucht. Des Weiteren wurden Anlagenbesichtigungen durchgeführt und dabei Fragen an das Strahlenschutz-Personal gestellt um die Erkenntnisse in das Generische DWR-Modell einer Konvoi-Anlage einfließen zu lassen.

3.1 Erkenntnisse aus internationaler Literatur

International wird hinsichtlich der Generationenfolge von Kernkraftwerken (mit Druckwasserreaktoren) eine andere Zählweise angewandt als in dieser Studie, die sich mit deutschen DWR von KWU/Siemens beschäftigt. Die vierte Generation von KWU/Siemens gehört international auf Grund der Baujahre (1980er Jahre) zur Generation-II, weist jedoch viele Charakteristika internationaler Generation-III- und sogar Generation-III+-Anlagen auf /MAR 14/. Insofern sind die deutschen Konvoi-Anlagen nur bedingt mit ausländischen Anlagen vergleichbar, bzw. können aus Strahlenschutz-Gesichtspunkten mit deutlich neueren Anlagen verglichen werden. Um zu den internationalen Generation-III-Anlagen zu zählen fehlt den Konvoi-Anlagen im Wesentlichen ein Mechanismus, einen geschmolzenen Reaktorkern aufzufangen („Core Catcher“). Andere passive und mehrfach redundante Sicherheitssysteme sind dagegen bereits vorhanden.

Durch verschiedene Maßnahmen wurde auch in KKW mit Druckwasserreaktoren der KWU-Generationen 2 und 3 im Laufe der rund 30-jährigen Betriebszeit der Entstehung und Ablagerung von Radionukliden entgegengewirkt /STE 12/. Dadurch konnten die Ortsdosisleistungen an den Kühlmittelleitungen teils deutlich gesenkt werden. Dies zeigt zum Beispiel die Abb. 3.1 zur ODL-Entwicklung in einem KKW mit DWR der dritten Generation von KWU/Siemens seit Betriebsbeginn bis 2012. Zunächst wurde mit koordinierter Bor-Lithium-Chemie bei konstantem pH von 6,9 gefahren. Noch während der Phase des Aktivitätsaufbaus wurde Ende der 1980er-Jahre auf die modifizierte Kühlmittelchemie umgestellt, wobei ein Ziel-pH-Wert von 7,4 eingestellt wurde. Seit Ende der 1990er-Jahre wurde ¹⁰B-angereichertes Bor bei pH 7,1 angewendet. Bereits seit ca. 1990 blieb die ODL damit stabil oder ging geringfügig zurück. Seit Beginn der

Zink-Einspeisung im Jahre 2004 sank die ODL deutlich. Durch die Systemdekontamination (FSD) im Jahr 2010 sank die ODL sprunghaft bis auf das Niveau der Konvoi-Anlagen. Durch einen Passivierungsschritt am Ende der FSD konnte die Rekontamination gemindert werden.

Auch international wurde die Kühlmittelchemie vergleichbar angepasst. Der Einfluss der Zn-Einspeisung wird – im Gegensatz zu Erfahrungen mit deutschen Anlagen – aber nicht immer positiv bewertet /CUR 14/.

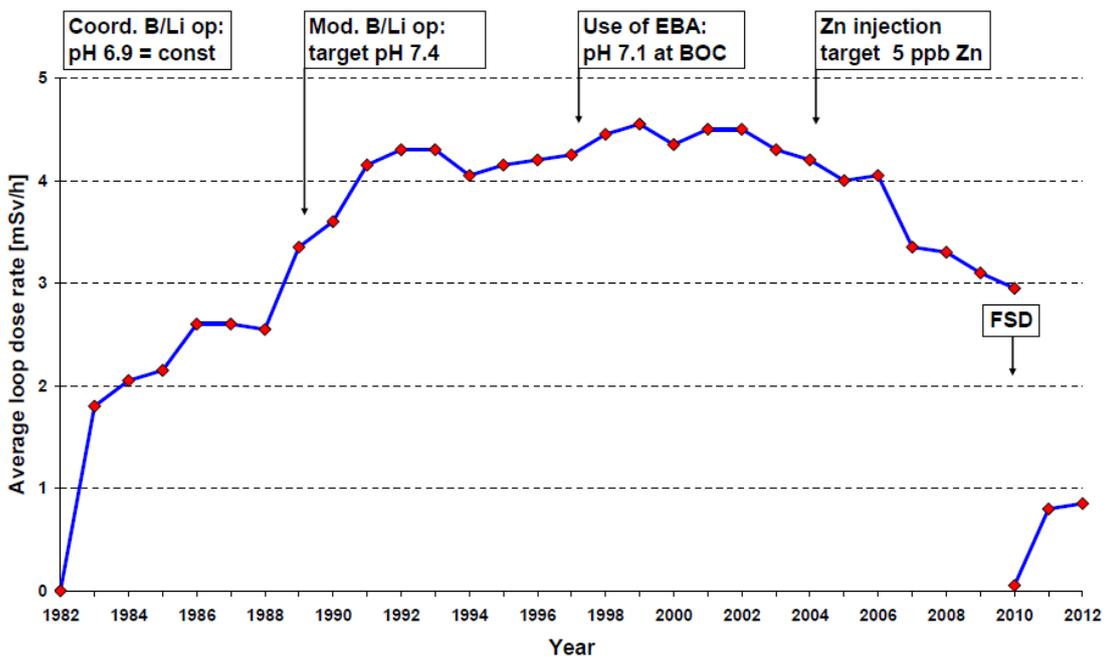


Abb. 3.1 ODL-Entwicklung und Veränderungen der Kühlmittelchemie in einem deutschen KKW der 3. Generation /STE 12/

3.2 Erkenntnisse aus Anlagenbesuchen aus anderen Vorhaben

Bereits bevor eine Besichtigung eines Konvoi-Kernkraftwerkes möglich war, wurden GRS-intern mit Mitarbeitern der Abteilung „Anlagentechnik“ die in Kapitel 1 und 2 erläuterten Fragenstellungen dieses Vorhabens erörtert. Die Mitarbeiter der Abteilung Anlagentechnik führen in größerer Regelmäßigkeit Anlagenbesuche durch und stehen im Allgemeinen in engerem Kontakt zu KKW-Betreibern.

Folgende Informationen wurden in diesem Gespräch hinsichtlich der zu erwartenden Nuklidvektoren gewonnen:

- Auch in Konvoi-Anlagen gibt es so genannte „Hot-Spots“, also Stellen im Primärkreislauf mit vergleichsweise deutlich erhöhter Aktivität. Die betroffenen Stellen sind üblicherweise die gleichen wie auch in älteren Anlagen. Auch in Anlagen der vierten KWU/Siemens-Generation DWR gibt es Sperrbereiche. Davon abgesehen ist eine Begehung im Leistungsbetrieb – anders als bei Anlagen älterer Bauarten – nahe am Primärkreislauf möglich.
- Die höchste Aktivität und die größte Masse an Radionukliden befinden sich in den U-Rohren der Dampferzeuger. Dies begründet sich mit der großen Oberfläche und der Vielzahl von Rohren.
- Kontaminationen bestehen ausschließlich aus aktivierten Metalloxiden und nicht aus Spaltprodukten. Letztere sind alle gut löslich und werden unmittelbar aus dem Wasser gefiltert, so dass sich diese eher nicht an- oder ablagern.
- Die Betreiber von Konvoi-Anlagen erwägen eine Systemdekontamination vor der Stilllegung durchzuführen. Die Entscheidungen hierzu sind aber noch nicht gefallen. Systemdekontaminationen zum Weiterbetrieb und zur Dosisminimierung bei Revisionen werden als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt.
- Sofern eine Systemdekontamination durchgeführt würde, kämen dabei die etablierten Verfahren zum Zuge (z. B. Areva HP CORD). Auf Grund des im Vergleich zu älteren Anlagen veränderten Nuklidvektors können jedoch andere Dekontaminationsfaktoren (DFen) erwartet werden. Möglicherweise werden auch weniger Reinigungs-Zyklen durchgeführt.
- Die Planung und Ausführung von Tätigkeiten in Revisionen erfolgt genauso wie in älteren Anlagen, es gibt keinen praktischen Unterschied.

3.3 Nutzbare Erkenntnisse aus dem internationalen ISOE-Symposium 2016

Das ISOE („Information System On Occupational Exposure“) wurde 1992 geschaffen, um Strahlenschützern von Betreibern und Behörden weltweit ein Forum zur Verfügung zu stellen. Hierin werden Dosis(-Reduktions)-Informationen, Betriebserfahrungen und Informationen zur Verbesserung der Optimierung des Strahlenschutzes in Kernkraftwerken geteilt /ISO 17/.

3.3.1 Vorträge und Poster

Zum Thema der Kontamination von Kühlkreisläufen im Rahmen einer Sitzung im Themenblock Quellterm-Management wurden von Vertretern der Firmen Engie Laborelec, Belgien und EdF (Electricité de France) und Ringhals, Schweden vorgetragen /ISO 16/.

Das Nuklid ^{110m}Ag steigt in vielen ausländischen Anlagen (Frankreich, Schweden) in den letzten Jahren kontinuierlich an und gewinnt daher an radiologischer Bedeutung. Demgegenüber bleibt die Kobalt-60-Konzentration, die in der Regel sonst die Diskussionen beherrscht, seit vielen Jahren konstant. Inzwischen haben ^{110m}Ag und ^{60}Co ein ähnliches Niveau der Aktivitätskonzentration erreicht. Die Konzentration von ^{110m}Ag steigt im Betriebszyklus insbesondere beim Herunterfahren stark an. Der Ursprung von ^{110m}Ag kann mit Hilfe von Zinn-Isotopen als Tracer identifiziert werden. In Frankreich wurde speziell zur Entfernung von ^{110m}Ag ein Dekontaminationsverfahren entwickelt (EMMAg). Der mittlere Dekontfaktor für ^{110m}Ag liegt nach Erfahrungen von EdF bei 7. Die Kosten pro eingesparter Dosis werden von EdF mit 570.000 €/pers. Sv angegeben.

Ein weiteres radiologisch relevantes Radionuklid, welches in den letzten Jahren an Bedeutung in französischen und schwedischen KKW gewinnt, ist Antimon-124. Dessen Ursprung ist derzeit allerdings nicht genau bekannt, so dass noch keine Strategie zu dessen Vermeidung existiert.

In Frankreich wird erst seit rund 10 Jahren Zinkeinspeisung durchgeführt. Diese soll die ^{60}Co -Konzentration durch Austauschreaktionen und Diffusion in den Oxidschichten des Kühlkreislaufs reduzieren. Bisher wird in 15 von 58 Reaktoren in Frankreich Zinkeinspeisung durchgeführt. Im Gegensatz zu den Erfahrungen in Deutschland und vielen anderen Ländern zeigt die Zn-Einspeisung in Frankreich bisher kaum Erfolg im Hinblick auf eine Reduzierung der Ortsdosisleistung.

Vertreter der ENGIE Tractebel Engineering (Belgien) stellten ein mathematisches Verfahren vor, mit dessen Hilfe die Liste radiologisch relevanter Isotope reduziert werden kann um mit geringer Unsicherheit die zu erwartende Dosis von Arbeitern abzuschätzen. Eine zunächst sehr lange Liste von Radionukliden wird in mehreren Schritten gefiltert und verkürzt, so dass diese Liste besser zu handhaben ist. Die „Filter“ führen jeweils unterschiedliche Gewichtungen durch: 1. Relative Aktivität, 2. Relatives Gewicht (Aktivität * Photonenenergie * Verzweigungsfaktor), 3. Gamma-Energie (fügt in 2. aus-

geschlossene Nuklide ggfs. wieder hinzu). Die Methode führt zu Abweichungen in der berechneten Ortsdosisleistung im Bereich von nur 1 %.

Die von ENGIE vorgestellte Vorgehensweise ist im Einklang mit dem Vorgehen bei der Auswahl relevanter Nuklide zur Erstellung von Nuklidvektoren im Vorläufervorhaben zu dieser Arbeit und beruht auf derselben Argumentation.

3.3.2 Auswertung von Erfahrungsberichten

Am Rande des ISOE-Symposiums wurden Gespräche mit Vertretern eines Systemdekontaminations-Dienstleisters zum Thema Kontamination des Primärkreislaufes von Konvoi-Anlagen und zu deren möglicher Systemdekontamination geführt. In den Gesprächen konnten folgende Erkenntnisse bzw. Einschätzungen aufgenommen werden, welche in der generischen Studie zu Generation-4-DWR berücksichtigt wurden:

- Auch in Konvoi-Anlagen ist ^{60}Co noch das wichtigste Radionuklid. Die Bedeutung von ^{51}Cr ist jedoch größer als in älteren Anlagen. Außerdem spielen noch ^{54}Mn und ^{59}Fe eine Rolle. In Anlagen (Vor-Konvoi) mit Zn-Einspeisung findet man höhere ^{51}Cr -Konzentrationen als in Anlagen ohne Zn-Einspeisung.
- Eine Systemdekontamination in Konvoi-Anlagen wird sowohl für den späteren Weiterbetrieb als auch vor der Stilllegung als unwahrscheinlich eingeschätzt. Die Gründe hierfür sind einerseits der verhältnismäßig geringe Nutzen, da die Ortsdosisleistungen in Konvoi-Anlagen ohnehin gering sind und andererseits die damit verbundenen Kosten. Auf Nachfrage, ob nicht dennoch Vorteile beim Abbau entstünden, weil etwa keine lose anhaftende Kontamination an inneren Flächen freigesetzt werden können und damit z. B. aufwändige Einhausungen gespart werden könnten, wurde erklärt, dass große Teile der Kontamination ins Grundmaterial eindiffundiert sind und sich mit den üblicherweise eingesetzten Verfahren nicht lösen ließen. Einhausungen etc. wären daher trotzdem nötig. Ein Verfahren wie zum Beispiel Areva HP CORD D (D für Decommissioning) oder DfD von EPRI/Westinghouse mit Grundmetallabtrag wäre effektiv, erfordert jedoch eine erteilte Stilllegungsgenehmigung. Damit würde insgesamt mehr Zeit benötigt, die mit entsprechenden weiteren Zusatzkosten verbunden ist. Dies mache eine FSD von Konvoi-Anlagen wirtschaftlich unattraktiv.

- Würden dennoch FSDs in Konvoi-Anlagen durchgeführt, könnten die gleichen Verfahren zum Einsatz kommen wie in älteren KKW, da das Mittel zur Dekontaminierung immer die Auflösung der Oxidschichten ist, welche sich nicht wesentlich unterscheiden. Wurde eine Zn-Einspeisung zur Betriebszeit durchgeführt, lassen sich Oxidschichten schwerer auflösen. Im Allgemeinen ist der Dekontfaktor für verschiedene Nuklide unterschiedlich. Dennoch ist die theoretische Gleichbehandlung eine vernünftige und nachvollziehbare Näherung, besonders wenn man Metalloxide betrachtet. Für Transurane oder Nuklide wie ^{110m}Ag und ^{124}Sb ist die Näherung dagegen weniger gut.

Die neu gewonnenen Erkenntnisse, die in diesem Kapitel aufgeführt sind, wurden zur Überarbeitung der Konvoi-Nuklidvektoren und ggfs. zur Anpassung der Tätigkeitsmodelle herangezogen, welche im Folgenden Kapitel beschrieben werden.

3.4 Umfangreiche Tätigkeiten / Abbautätigkeiten

Im Vorläufervorhaben wurden Tätigkeiten simuliert, die während der Revisionen routinemäßig oder häufig vorkommen. Dies betraf Inspektionen, Wartungsarbeiten und Reparaturen an Dampferzeugern, am Druckhalter und an den Hauptkühlmittelpumpen. Die gute Datenbasis dazu in der ISOE-Datenbank über eine Vielzahl an Anlagen ermöglichte die Modellkette zu optimieren und die Simulationsergebnisse zu verifizieren.

Neben den regelmäßig stattfindenden Tätigkeiten, sind in der ISOE-Datenbank auch sogenannte „umfangreiche Arbeiten“ („large tasks“) aufgeführt, die dort jedoch zumeist nicht näher spezifiziert werden. Darunter fallen Arbeiten wie der Austausch einer Großkomponente wie Hauptkühlmittelpumpe oder Dampferzeuger oder auch des RDB-Deckels. In Deutschland wurden 1983 im KKW Obrigheim die Dampferzeuger ausgetauscht. International, besonders etwa in Frankreich bzw. in Framatom-Anlagen, ist der Austausch von Dampferzeugern eine häufiger auftretende, beinahe schon eine Routineaufgabe /SCH 16/. Auch der Austausch des RDB-Deckels wurde bereits häufiger in ausländischen KKW durchgeführt, beispielsweise in Belgien /VER 16/ und Spanien /PUJ 16/. Die genannten umfangreichen Tätigkeiten sind zwar bei Revisionen in Deutschland nicht mehr zu erwarten. Dennoch liefern die Erfahrungen aus dem Ausland gute Hinweise und Daten über den Ablauf und die Planung dieser Arbeiten, sowie zur Exposition von beteiligten Arbeitskräften. In Deutschland rückt der Abbau immer stärker in den Fokus. Die Demontage von Großkomponenten stellt in dem Zusammenhang „die Hälfte“ des Austauschvorgangs dar, sofern von einer Zerlegung in Einbaula-

ge abgesehen wird. Mit diesen Einschränkungen können Daten zum Austausch von Großkomponenten mit Simulationen zum Abbau verglichen werden.

Wie Abb. 3.2 zeigt, wird die Durchführung von Großprojekten wie der Austausch eines Dampferzeugers auch in anderen Arbeiten im Vorfeld simuliert. In der Arbeit von M. Schienbein und T. Bursian /SCH 16/ wird hierzu die Software „RANKERN“ eingesetzt.

Im Ergebnis kann so zum Beispiel abgeschätzt werden, welchen Einfluss das Einbringen zusätzlicher Abschirmungen am Dampferzeuger auf die resultierenden Ortsdosisleistungen in verschiedenen Tätigkeitsphasen beim Dampferzeugertausch hat (s. Abb. 3.2 und Abb. 3.3).

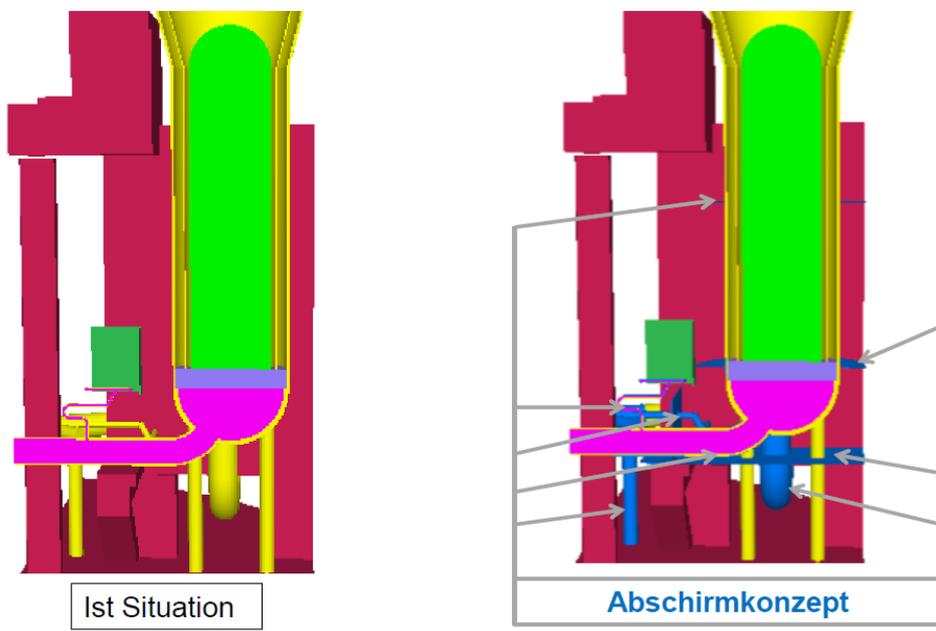


Abb. 3.2 Darstellung von Abschirmmaßnahmen vor dem Austausch eines Dampferzeugers in einer Framatom-Anlage /SCH 16/

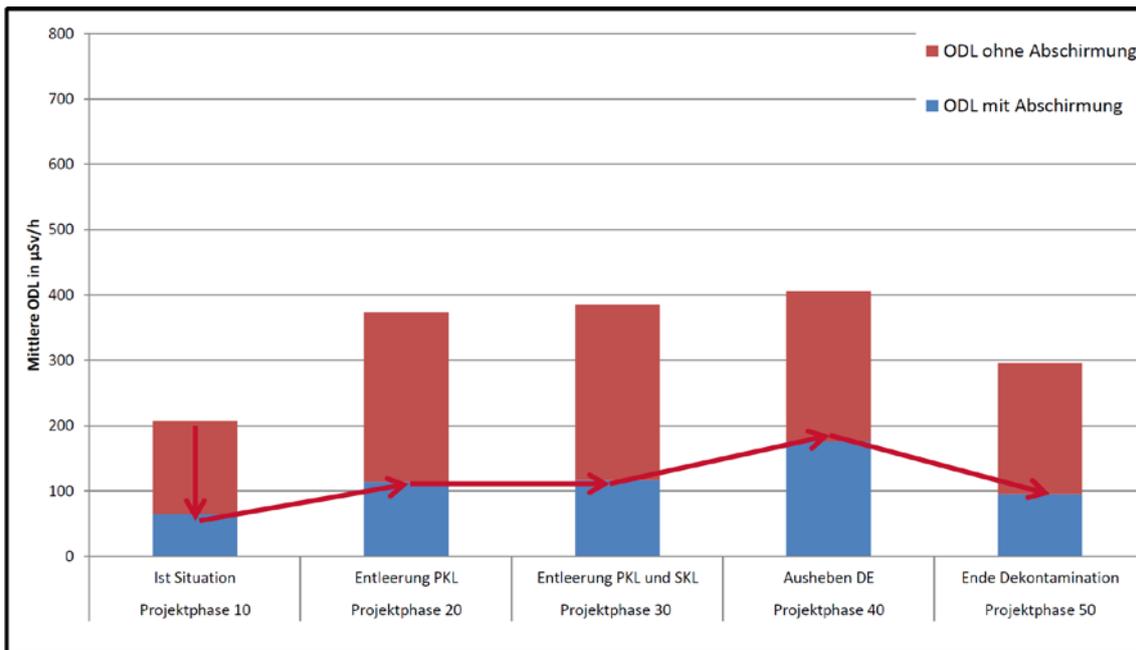


Abb. 3.3 ODL-Prognosen heiße Seite mit und ohne Abschirmungen zu verschiedenen Phasen des DE-Tausches in einer Framatom-Anlage /SCH 16/

3.5 Neue Erkenntnisse zum Primärkreislaufdekontaminationsverfahren ASDOC_D /KEM 17/

In /GRS 16/ wurde ein Überblick über gängige Verfahren zur Dekontamination von Primärkreisläufen in Druckwasserreaktoren national sowie international gegeben. Die Mehrzahl an Systemdekontaminationen in Deutschland wurde mittels Varianten des Areva-Verfahrens HP CORD durchgeführt, welches seit den 1970er Jahren von Siemens und Areva entwickelt und eingesetzt wurde. Eine im Vergleich relativ neue Methode stellt das ASDOC_D-Verfahren von Siempelkamp NIS-Ingenieurgesellschaft dar, welches erstmals 2013 in der Anlage Biblis Block A (KWB-A) zur Anwendung kam. Hierbei wurden Teile der Hauptkühlmittelpumpen (Gewindestange unter Hutmutter) durch den Ätzangriff beschädigt und die FSD wurde nach zwei Zyklen vorläufig abgebrochen. In der Folge wurde dieses Ereignis ausgewertet und das Verfahren anlagen-spezifisch modifiziert und optimiert. Hierzu wurden auch Versuche unter Einbeziehung aller relevanten Werkstoffe im Primärkreislauf durchgeführt. Unter den modifizierten Bedingungen (ASDOC_D-MOD) konnte die FSD im KWB-A 2016 fortgesetzt und erfolgreich abgeschlossen werden. Die wesentliche Modifikation des Verfahrens bestand darin, die korrosive Wirkung zu reduzieren indem der pH-Wert angehoben wurde. Anstelle von Schwefelsäure wurde Methylsulfonsäure (MSA) eingesetzt und Wasserstoffperoxid nach Bedarf zusätzlich eingespeist. Dadurch wird den metallischen Oberflä-

chen zusätzlicher Sauerstoff zur Passivierung angeboten. Während der neuerlichen Durchführung der FSD wurden parallel, d. h. im Bypass, Materialproben unter FSD-Bedingungen behandelt und überwacht (siehe Abb. 3.4).

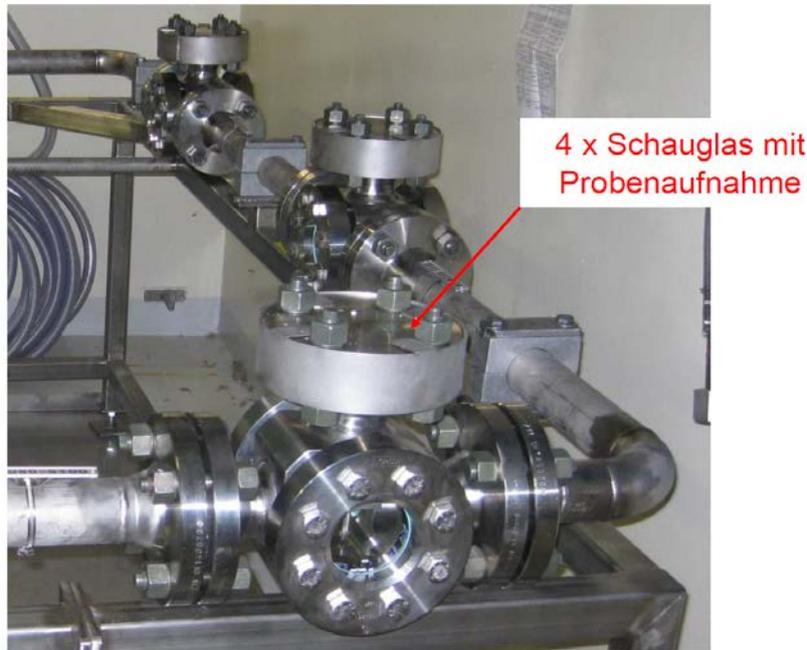


Abb. 3.4 Probenstrecke zur Auslagerung von Materialproben /KEM 17/

Im Ergebnis wurde insgesamt ein Dekontfaktor von 90 erreicht. Dabei wurden $7,8E12$ Bq an ^{60}Co ausgetragen. 75 kg Eisen (99 % Fe(III)) aus der Oxidschicht wurden entfernt. Das Eisen stammt dabei (unbeabsichtigt) überwiegend aus dem RDB. Der Materialabtrag am Referenzwerkstoff 1.4923 betrug $1,08 \mu\text{m}$, wobei der Abbruch-Grenzwert auf 80 mm festgelegt worden war. Der mittlere Dekontfaktor teilt sich wie folgt auf verschiedene Systeme auf: Hauptkühlmittelleitungen: 130 ($9 \mu\text{Sv/h}$ statt zuvor $1159 \mu\text{Sv/h}$), Dampferzeuger: 120 ($4 \mu\text{Sv/h}$ statt zuvor $482 \mu\text{Sv/h}$), Hauptkühlmittelpumpen (Eintrittseite): 104 ($9 \mu\text{Sv/h}$ statt zuvor $932 \mu\text{Sv/h}$). Die hier angegebenen DFen wurden aus den in /KEM 17/ angegebenen und hier zitierten ODLen berechnet. Die in der angegebenen Quelle aufgeführten DFen (150, 78 und 411 für Loopleitung, DE, HKMP) weichen teils deutlich ab und sind in /KEN 17/ nicht nachvollziehbar. Im persönlichen Gespräch mit RWE- und NIS-Mitarbeitern wurden allerdings die zuletzt genannten Werte bestätigt. Die erreichten Dekontfaktoren liegen im Wertebereich früherer Systemdekontaminationen mit den Areva-Verfahren oder gehen – wie im Falle der Hauptkühlmittelleitungen – sogar darüber hinaus. Auf Nachfrage bei den Autoren wurden noch DFen von 24 für den Druckhalter und 7 für die „Surge Line“ angegeben. Diese Komponenten sind erfahrungsgemäß weniger gut dekontaminierbar.

Eine Systemdekontamination des Blockes B in Biblis begann in KW 43/2017 und sollte weitgehend genauso wie im Block A durchgeführt werden. Mit einem Abschluss der FSD wird für Februar oder März 2018 gerechnet.

Im persönlichen Gespräch während eines Anlagenbesuches im KWB-B wurden die Unterschiede des ASDOC_D_MOD-Verfahrens im Vergleich zu HP CORD dargestellt. Während bei HP CORD UV der Dienstleister Areva den Großteil der Arbeiten zur Vorbereitung und Durchführung der FSD übernimmt und dabei dessen eigene Systeme in die Anlage einbringt, wird bei ASDOC_D_MOD stärker auf vorhandene Systeme und das Eigenpersonal gesetzt. Vom DWR werden die HKMP aktiv eingesetzt, die Chemikaliengabe erfolgt über eigene Systeme (z. B. über den Borsäurebehälter) und die betrieblichen Ionentauscher werden verwendet. Das Eigenpersonal wird bei der Vorbereitung und der Durchführung der FSD entscheidend eingesetzt. Die Chemikalienkonzentrationen und damit der Abtrag an kontaminierter Oxidschicht pro Zyklus sind geringer als bei HP CORD, so dass bei gleichem gewünschtem Dekontfaktor (DF) mehr Zyklen notwendig sind und die Gesamtdauer des Verfahrens i. A. länger ist. Durch den wesentlichen Einsatz von Eigenpersonal ist dieser Aspekt jedoch weniger kostenentscheidend. Auf der anderen Seite kommt dem Einsatz des Eigenpersonals eine nicht zu unterschätzende soziale Komponente hinzu: Das Personal bleibt motiviert und kann sinnvoll nach dem Ende des Leistungsbetriebes weiter beschäftigt werden. Innerhalb des Betriebes kann von den Erfahrungen der FSD(s) für zukünftige Projekte profitiert werden, insbesondere in Doppelblockanlagen wie KWB.

3.6 Erkenntnisse aus der Anlagenbesichtigung eines Konvoi-Kraftwerkes

Im Mai 2017 besichtigten zwei GRS-Mitarbeiter eine KWU/Siemens-Anlage der vierten DWR-Generation (Konvoi). Dabei wurde ein ausführliches Gespräch mit Kraftwerksmitarbeitern, insbesondere des dortigen Strahlenschutzes, geführt. Die in Kapitel 2 erläuterten Fragen konnten dabei mit dem Personal erörtert werden. Darüber hinaus wurde eine Begehung der Anlage, welche sich zu dem Zeitpunkt in der Jahresrevision befand, durchgeführt. Der Reaktor wurde zwei Tage zuvor herunter gefahren. Mit Hilfe von ODL-Messgeräten (auch) mit Messlanze, wurde an ausgewählten Punkten des Primärkreislaufes jeweils die Kontaktdosisleistung – entweder vor oder hinter einer ca. 15 cm dicken Isolierung – gemessen. Die gemessenen Werte sind in Tab. 3.1 aufgeführt. Während des Rundganges konnten an 18 verschiedenen Punkten ODL-Werte gemessen werden. Zusätzlich wurde von der Kontaktperson des Kraftwerks in Aus-

sicht gestellt, regelmäßig eingeholte Informationen zu Ortsdosisleistungen an ausgewählten Punkten am Primärkreislauf, die der GRS im Regelfall nicht vorliegen, weiter zu geben.

Die zeitliche Aufteilung der Arbeiten nach der Entfernung zur Haupt-Strahlenquelle wurde angesprochen. Es wurde für detaillierte Informationen hierzu auf Jahresberichte für Landesbehörden, für die RSK sowie die Revisionsberichte und die ISOE-Datenbank verwiesen. Im Grundsatz konnte die grobe Einteilung, wie sie im verwendeten Modell im Rahmen dieses Vorhabens (und des Vorläufervorhabens) Verwendung findet, aber bestätigt werden. Bevor konkrete Arbeiten aus Strahlenschutz-Sicht geplant werden, werden stets aktuelle ODL-Messwerte an den betreffenden Stellen erhoben.

Eine gezielte Anpassung des Wasserstandes im Primär- und im Sekundärkreislauf zwecks Dosisminimierung bei Revisionsarbeiten findet nicht statt. Der Wasserstand wird vielmehr „vorgefunden“. Dies hängt von dem übergeordneten Anlagenzustand ab. Ausnahmen sind natürlich Tätigkeiten die nur bei einem bestimmten Wasserstand (trocken) durchgeführt werden können. Weiterhin haben Revisionsarbeiten Vorrang, Prüfungen werden um diese Arbeiten herum geplant, möglichst mit radiologisch vorteilhaften Bedingungen.

Wenngleich bereits im Vorläufervorhaben ein Nuklidvektor für Konvoi-Anlagen qualitativ und teilweise quantitativ aufgestellt werden konnte, blieben noch einige Fragen offen, die insbesondere die Bedeutung von ^{60}Co betreffen. Der Kraftwerks-Mitarbeiter erläuterte, dass ^{60}Co in kurzen Zeiträumen bis zu einem Zeitraum von einem halben Jahr einen Anteil von ca. 25 – 30 % an der verursachten Gesamtexposition hat. Danach nimmt seine Dominanz weiter zu, d. h. für den Rückbau ist es das dominanteste Nuklid. Neben ^{60}Co sind noch die Isotope ^{58}Co und ^{51}Cr bis zu einem Zeitraum von einem halben Jahr in Bezug auf die ODL wichtig und damit insbesondere bei Revisionen von Belang. ^{137}Cs ist bei Anlagen der vierten Generation nicht im Nuklidvektor. Der letzte Brennelementschaden mit entsprechendem ^{137}Cs Austritt liegt über 13 Jahre zurück. In der besichtigten Anlage gibt es keine Auffälligkeiten in Bezug auf $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Nach Informationen des Kraftwerksmitarbeiters gilt dies auch für die beiden baugleichen Anlagen in Deutschland. Der Nuklidvektor unterscheidet sich ganz allgemein betrachtet in durchströmten Anlagenkomponenten von demjenigen in nicht oder weniger durchströmten Anlagenteilen wie z. B. dem Druckhalter. Es wird keine Zink-Fahrweise in der besuchten Anlage durchgeführt. Für die derzeit absehbaren Zeiträume einer Stilllegung der Anlage kann ^{60}Co als Leitnuklid für die radiologische Charakterisierung dienen.

Ob vorausgehend bzw. im Rahmen der Stilllegung eine Systemdekontamination in Konvoi-Anlagen durchgeführt werden sollte, ist noch nicht abschließend entschieden. Der KKW-Mitarbeiter aus der Abteilung Strahlenschutz ist der Meinung, dass eine FSD vor allem in Bezug auf den Strahlenschutz und die Wahl der eingesetzten Techniken beim späteren Abbau große Vorteile haben könnte. Eine Untersuchung des Einflusses einer Systemdekontamination auf die Gesamt-„Abbaudosis“ und ihre Auswirkungen auf die anfallenden Abfallströme wäre von großem Interesse für alle Stilllegungsprojekte. Von GRS-Seite wurde erläutert, dass im Rahmen dieses Vorhabens ausgewählte Abbautätigkeiten auch vergleichend simuliert werden können.

Die bei der Anlagenbesichtigung erfassten Messwerte sind nachfolgend aufgeführt.

Tab. 3.1 Ortsdosisleistungen an ausgewählten Punkten am Primärkreislauf einer Konvoi-Anlage. Sämtliche ODLen sind im Kontakt gemessen worden (an der Isolierung oder darunter)

Ort	Genauere Beschreibung	ODL in $\mu\text{Sv/h}$	Isolierung
HKMP4	unten am Gehäuse	10	ja
	ohne Motor & Axiallager in der Laterne	2	nein
	Loopleitung kalt	160	ja
	Loopleitung kalt	140	nein
DE4 Sekundärkreis voll	Loopleitung heiß	60	nein
	Übergang Wasserkammer heiß	130	nein
	Übergang Wasserkammer kalt	100	ja
	Handlochebene 12 m	3	ja
	16 m Ebene	3	ja
DE3 Sekundärkreis voll	16 m Ebene (Messpunkt 18)	12	ja
DH	Mannloch oben	30	ja
	Sprühleitungen oberhalb	1000 – 1100	nein
	Mitte (Handloch?)	3 bis 5	ja
	unten	5	ja
	Restentleerungsleitung Durchmesser 3 – 4cm	50	nein
Abblasebehälter	oben Rohre	10	nein
	Mannloch	2 bis 3	nein
KBA	Leitung zw. DH und Abblasebehälter	150	nein
ALARA Bereich	Rückzugsbereich für Besprechungen u. ä.	< 0,5	nein

4 Modifikationen/ Erweiterungen der Simulationskette

4.1 Modifikation des Nuklidvektors für Anlagen vom Typ Konvoi

Die Daten zur Kühlmittelaktivität in Konvoi-Anlagen, welche seit der Auswertung im Vorläufervorhaben hinzugekommen sind, unterscheiden sich nicht signifikant von den Bestandsdaten, so dass eine Berücksichtigung lediglich zu marginalen Veränderungen führen würde. Qualitativ wird deshalb der im Vorläufervorhaben erarbeitete Nuklidvektor, d. h. die jeweiligen Aktivitätsverhältnisse, nicht verändert. Der (willkürlich) auf ^{60}Co normierte generische Nuklidvektor für Konvoi, reduziert auf aktivierte Metalloxide bleibt damit:

Tab. 4.1 Normierter Nuklidvektor für Konvoi-Anlagen

Nuklid	Aktivität (Bq) normiert auf Co-60
Cr-51	8,20E+00
Mn-54	2,79E+00
Fe-59	5,81E-01
Co-58	2,58E+00
Co-60	1,00E+00

Die Besichtigung einer Anlage vom Typ Konvoi hat neue Erkenntnisse zu tatsächlichen Ortsdosisleistungen an verschiedenen repräsentativen Stellen am Primärkreislauf erbracht (s. Kapitel 3.5, Tab. 3.1). Auf dieser Grundlage können – analog zur Vorgehensweise bei Anlagen der zweiten und dritten KWU/Siemens-Anlagengeneration im Vorläufervorhaben – Rücksimulationen mittels MicroShield durchgeführt werden. Dadurch können verfeinerte system- und komponentenspezifische Nuklidvektoren für anhaftende Kontamination erstellt werden.

Es ergeben sich damit die folgenden Aufteilungen einer Gesamtaktivität von rund 3E13 Bq auf die Systeme.

Tab. 4.2 Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Revision)

System / Komponente	Anzahl	Oberfläche (cm ² , im Modell) je Komponente	Spezifische Aktivität (Bq/cm ²)	Gesamtaktivität (Bq)
Dampferzeuger-Wasserkammer	8	94025	3,39E07	2,55E13
Dampferzeuger-U-Rohrbündel	4	919423 cm ² ² 4,46E07 cm ³	2,1E05 Bq/cm ² 7,56E02 Bq/cm ³	1,95E11
Hauptkühlmittelleitung	4	845120	2,49E05	8,42E11
Hauptkühlmittelpumpe (Unterteil)	4	75180	2,73E04	2,05E09
Druckhalter (unten)	1	1102699	6,88E05	7,59E11
RDB & -Einbauten	1	3606038	-	9,00E11
Not- & Nachkühlsystem	1	-	-	1,00E12

Tab. 4.3 Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Stilllegung, ohne FSD)

System / Komponente	Anzahl	Oberfläche (cm ² , im Modell) je Komponente	Spezifische Aktivität (Bq/cm ²)	Gesamtaktivität (Bq)
Dampferzeuger-Wasserkammer	8	94025	1,53E06	1,15E12
Dampferzeuger-U-Rohrbündel	4	919423	2,40E03 Bq/cm ² 8,64E00 Bq/cm ³	2,21E09
Hauptkühlmittelleitung	4	845120	1,13E04	3,81E10
Hauptkühlmittelpumpe	4	75180	1,24E03	3,71E08

² Im Computermodell werden die U-Rohrbündel als Volumenquelle ausgeführt. Das angegebenen Volumen umfasst Rohre, Inhalt und Zwischenräume

System / Komponente	Anzahl	Oberfläche (cm ² , im Modell) je Komponente	Spezifische Aktivität (Bq/cm ²)	Gesamtaktivität (Bq)
Dampferzeuger-Wasserkammer	8	94025	1,53E06	1,15E12
(Unterteil)				
Druckhalter (unten)	1	1102699	3,12E04	1,13E10
RDB & -Einbauten	1	3606038	-	~1,3E10
Not- & Nachkühlsystem	1	-	-	~1,4E10

Die Gespräche mit Betreibern und Dienstleistern konnten keine eindeutige Abschätzung möglicher Dekontaminationsergebnisse bzw. Dekontfaktoren in Konvoi-Anlagen liefern. Da jedoch sicher ist, dass die gleichen Verfahren zum Einsatz kommen würden und die verbauten Materialien im Primärkreislauf – mit Ausnahme Stellite-haltiger Stoffe – weitgehend identisch mit denen in Vor-Konvoi-Anlagen sind, werden die komponentenabhängigen DFen aus dem Vorläufervorhaben als Anhaltspunkt weiter verwendet. Diese wurden durch Mittelung über alle zur Verfügung stehenden Daten zu Systemdekontaminationen in deutschen DWR-Anlagen gewonnen. Da das ODL-Niveau in Konvoi-Anlagen generell niedrig ist, kann erwartet werden, dass eine FSD hier hauptsächlich zum Entfernen lose anhaftender Kontamination durchgeführt wird um den Abbau zu vereinfachen und die radioaktiven Abfälle zu minimieren. Deshalb wird ferner erwartet, dass weniger Dekontaminationszyklen gefahren werden (können) als bei zurückliegenden FSDs in älteren Anlagen. Als Referenzwert eines Dekontfaktors wird der niedrigste Wert der ermittelten Spannweite für das Gesamtsystem von 60 heran gezogen. Für die Hauptkühlmittelpumpe wird dieser DF direkt verwendet, für die Hauptkühlmittelleitungen halbiert (30) und für Dampferzeuger verdoppelt (120). Die auf diese Weise abgeleiteten komponentenspezifischen Dekontfaktoren liegen im unteren Bereich der Spannweite gemessener Realwerte bei älteren deutschen DWRen.

Unter Anwendung dieser Dekontfaktoren ergibt sich die Aktivitätsverteilung auf die betrachteten Systeme wie folgt:

Tab. 4.4 Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Stilllegung, mit FSD)

System / Komponente	Anzahl	Oberfläche (cm ² , im Modell) je Komponente	Spezifische Aktivität (Bq/cm ²)	Gesamtaktivität (Bq)
Dampferzeuger-Wasserkammer	8	94025	1,28E04	9,58E09
Dampferzeuger-U-Rohrbündel	4	919423	2,00E01 Bq/cm ² 7,20E-02 Bq/cm ³	1,84E07
Hauptkühlmittelleitung	4	845120	3,77E02	1,27E09
Hauptkühlmittelpumpe (Unterteil)	4	75180	2,07E01	6,18E06

In Folge des fünfjährigen Abklingens und durch Systemdekontaminationen komponentenabhängig um einen konstanten Faktor gemindert, ergibt sich für Konvoi-Anlagen ein Abbau-Nuklidvektor, der radiologisch betrachtet allein von ⁶⁰Co bestimmt wird:

(7,5E-08 ⁵⁸Co; 1,0E00 ⁶⁰Co; 1,61E-19 ⁵¹Cr; 6,56E-13 ⁵⁹Fe; 9,15E-02 ⁵⁴Mn).

Alle übrigen Radionuklide sind in ihrer Aktivität vernachlässigbar.

4.2 Modifikation des Nuklidvektors für Rückbautätigkeiten bei Anlagen der 2. und 3. Generation KWU/Siemens

Um die Strahlenexposition eines durchschnittlichen Arbeiters während des Rückbaus eines DWR der 2. und 3. Generation KWU/Siemens generisch abbilden zu können werden die im Vorgängervorhaben /GRS 16/ hergeleiteten, komponentenspezifischen Nuklidvektoren genutzt. Diese waren bereits für eine Systemdekontamination (FSD) bei einer Revision berechnet und wurden nun zusätzlich einem radioaktiven Zerfall von fünf Jahren unterzogen um den Übergang und die Vorbereitungen bis zum Abbaubeginn nachzustellen. Ein Zeitraum von fünf Jahren erscheint für planmäßig abgeschaltete Anlagen und die generische Betrachtung ein sinnvoller Zeitansatz, selbst dann, wenn der Abbau früher beginnt. Erfahrungsgemäß dauert der nukleare KKW-Rückbau mindestens 10 Jahre.

4.2.1 Modifikation des Nuklidvektors für Rückbautätigkeiten bei Anlagen der 2. Generation KWU/Siemens

Nach Systemdekontamination bei Stilllegungsbeginn und 5 Jahre nach endgültiger Abschaltung:

Tab. 4.5 Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Gen. 2, Stilllegung, mit FSD)

System / Komponente	Anzahl	Oberfläche (cm ² , im Modell)	Spezifische Aktivität (Bq/cm ²)	Gesamtaktivität (Bq)
Dampferzeuger-Wasserkammer	8	94025	9,43E+04	8,87E+09
Dampferzeuger-U-Rohrbündel	4	919423	1,02E+04	9,35E+09
Hauptkühlmitteleitung	4	845120	1,02E+04	8,64E+09
Hauptkühlmittelpumpe (Unterteil)	4	75180	9,37E+03	7,05E+08
Druckhalter	1	1102699	1,16E+04	1,28E+10
RDB & -Einbauten	1	3606038	-	-
Not- & Nachkühlsystem	1	-	-	-

4.2.2 Modifikation des Nuklidvektors für Rückbautätigkeiten bei Anlagen der 3. Generation KWU/Siemens

Nach Systemdekontamination bei Stilllegungsbeginn und 5 Jahre nach endgültiger Abschaltung:

Tab. 4.6 Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Gen. 3, Stilllegung, mit FSD)

System / Komponente	Anzahl	Oberfläche (cm ² , im Modell)	Spezifische Aktivität (Bq/cm ²)	Gesamtaktivität (Bq)
Dampferzeuger-Wasserkammer	8	94025	4,64E+04	4,36E+09
Dampferzeuger-U-Rohrbündel	4	919423	4,24E+03	3,90E+09
Hauptkühlmittelleitung	4	845120	3,90E+03	3,30E+09
Hauptkühlmittelpumpe (Unterteil)	4	75180	2,14E+03	1,61E+08
Druckhalter	1	1102699	4,43E+03	4,88E+09
RDB & -Einbauten	1	3606038	-	-
Not- & Nachkühlssystem	1	-	-	-

4.3 Abbildung von dosisintensiven Tätigkeiten in Ortsdosisleistungsfeldern auf das generische Modell

Die Erkenntnisse aus Gesprächen mit Betreibern von Konvoi-Anlagen haben ergeben, dass Tätigkeiten in Anlagen dieses Typs nicht anders geplant und durchgeführt werden als in deutschen Anlagen älterer Bauart. Die Tätigkeitsmodelle, wie sie im Vorläufervorhaben definiert und angewendet wurden /GRS 16/, werden deshalb auch auf Konvoi-Anlagen unverändert angewendet. Dies betrifft die Tätigkeiten „Hauptkühlmittelpumpen-Inspektion/Wartung“, „Reparatur/Inspektion/Wartung am Druckhalter“ und „Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger“. Für die genaue Definition dieser Tätigkeiten wird auf den Abschlussbericht zum Vorläufervorhaben verwiesen /GRS 16/.

4.3.1 Ausbau eines Dampferzeugers als Großkomponente

Zusätzlich zu den bereits definierten Tätigkeiten werden Abbautätigkeiten simuliert. Als umfangreiche Einzelmaßnahme wird hierzu die Tätigkeit „Ausbau eines Dampferzeugers als Großkomponente“ betrachtet. In deutschen KKW in Stilllegung wurde diese Tätigkeit bereits mehrfach durchgeführt. Zusätzlich gibt es Erfahrungen – besonders aus dem Ausland – zum Austausch von Dampferzeugern, welcher nach Ansicht der Autoren gegebenenfalls auch die Situation beim Ausbau widerspiegelt. Als möglicher Unterschied ist beispielsweise zu nennen, dass beim Abbau bereits weitere Strahlenquellen vor der DE-Demontage entfernt worden sein können, wie etwa Hauptkühlmittelpumpen oder ein benachbarter Dampferzeuger und Kühlmittelleitungen. Zudem liegt die letztmalige Abschaltung der Anlage im Allgemeinen längere Zeit zurück als beim Austausch zum Weiterbetrieb. Des Weiteren ist es in Deutschland bei Anlagen der KWU/Siemens-Generationen 1 – 3 mittlerweile sehr verbreitet, vor dem Abbau eine Systemdekontamination durchzuführen, die das Aktivitätsniveau um etwa zwei Größenordnungen senkt.

In einigen Fällen findet im Abbaubetrieb eine Zerlegung der Dampferzeuger in Einbaulage statt. Dieser Fall wird hier nicht betrachtet.

Abweichend von den bisher betrachteten Instandsetzungs-/Inspektions- und Wartungsarbeiten, verändert sich die radiologische Situation beim Abbau während bzw. auf Grund seiner Durchführung. Deshalb ist es zweckmäßig, die betrachtete Tätigkeit nicht nur nach Aufenthaltsorten, sondern auch nach Zeiträumen zu gliedern. Für diese länger andauernde Tätigkeit wird ferner angenommen, dass zusätzliche Abschirmungen in Form von Bleiverkleidungen um die Dampferzeuger-Wasserkammern angebracht werden. Die Tätigkeit „Abbau eines Dampferzeugers“ enthält folgende Teilarbeiten in zwei Phasen:

Tab. 4.7 Aufteilung der Tätigkeit "DE-Abbau in Teiltätigkeiten"

Phase	Teiltätigkeiten, unter anderem:
Vorbereitung	Gerüstbau, Anbringen von Abschirmungen, Abisolieren, ggfs. punktuelle Dekontmaßnahmen
Hauptarbeiten	Ablassen des Sekundärwassers, Trennen von Sekundärwasserleitung, Frischdampfleitung, Primärkühlmittelleitungen, Abschlammleitungen; Hebeseile anschlagen; Ausheben

Die verschiedenen Teiltätigkeiten werden i. A. von unterschiedlichem Personal durchgeführt. Wie bereits bei den Tätigkeiten, die im Vorläufervorhaben generisch abgebildet wurden, wird auch für das generische Tätigkeitsmodell „DE-Abbau“ eine solche Differenzierung nicht durchgeführt. Für jede der beiden Phasen werden verschiedene repräsentative ODL-Messpunkte definiert. Auf Grund der in beiden Phasen unterschiedlichen radiologischen Situation, werden die Komponenten im Allgemeinen unterschiedlich als Quellen berücksichtigt. Folgende Punkte im 3D-Modell werden jeweils festgelegt:

Vorbereitungsphase:

1. an den Wasserkammern
2. auf halber DE-Höhe im Abstand 1 m
3. am Sekundärteil

Durchführung der Hauptarbeiten:

1. am Übergang Hauptkühlmittelleitung-Wasserkammer
2. auf halber DE-Höhe im Abstand 0,5 m
3. am Sekundärteil

Den beiden Phasen werden 66,6 %, respektive 33,3 % Zeitanteil zugewiesen, wobei ein Teil der Vorbereitungstätigkeit auch auf Nacharbeiten bezogen wird. Analog zur Vorgehensweise bei den Revisionstätigkeiten, die im Vorläufervorhaben definiert wurden, bilden jeweils drei Raumpunkte eine Stelle mit hoher, mittlerer und niedriger ODL ab. Wenngleich jeweils Punkt 3 ebenfalls einen Arbeitsbereich darstellt, eignet sich dieser auf Grund des (voraussichtlich) geringen ODL-Niveaus auch als Referenzpunkt, der Wege und Pausen mit repräsentiert.

Unter Verwendung von Informationen aus Anlagenbesuchen (siehe auch /GRS 16/) bzgl. der zeitlichen Aufteilung der Aufenthaltszeiten ergibt sich die Gesamtdosis näherungsweise folgendermaßen:

$$D = \text{Ges. Zeit} \cdot ((2 \% \text{ bis } 10 \%) \cdot \text{ODL}_{\text{nah}} + (30 \% \text{ bis } 50 \%) \cdot \text{ODL}_{\text{weit}} + (50 \% \text{ bis } 60 \%) \cdot \text{ODL}_{\text{Umgebung}}).$$

Hierbei bezeichnen:

- Ges. Zeit – Gesamtdauer der Tätigkeit
- ODL_x – Ortsdosisleistung nahe/weit entfernt und abgeschirmt/in der Umgebung des Gewerks (mittlere Entfernung)
- D – Gesamtdosis der Tätigkeit.

Zusätzlich zu dieser Aufteilung werden die Zeiten auf die Vor- und Hauptarbeiten zu 2/3 bzw. 1/3 aufgeteilt.

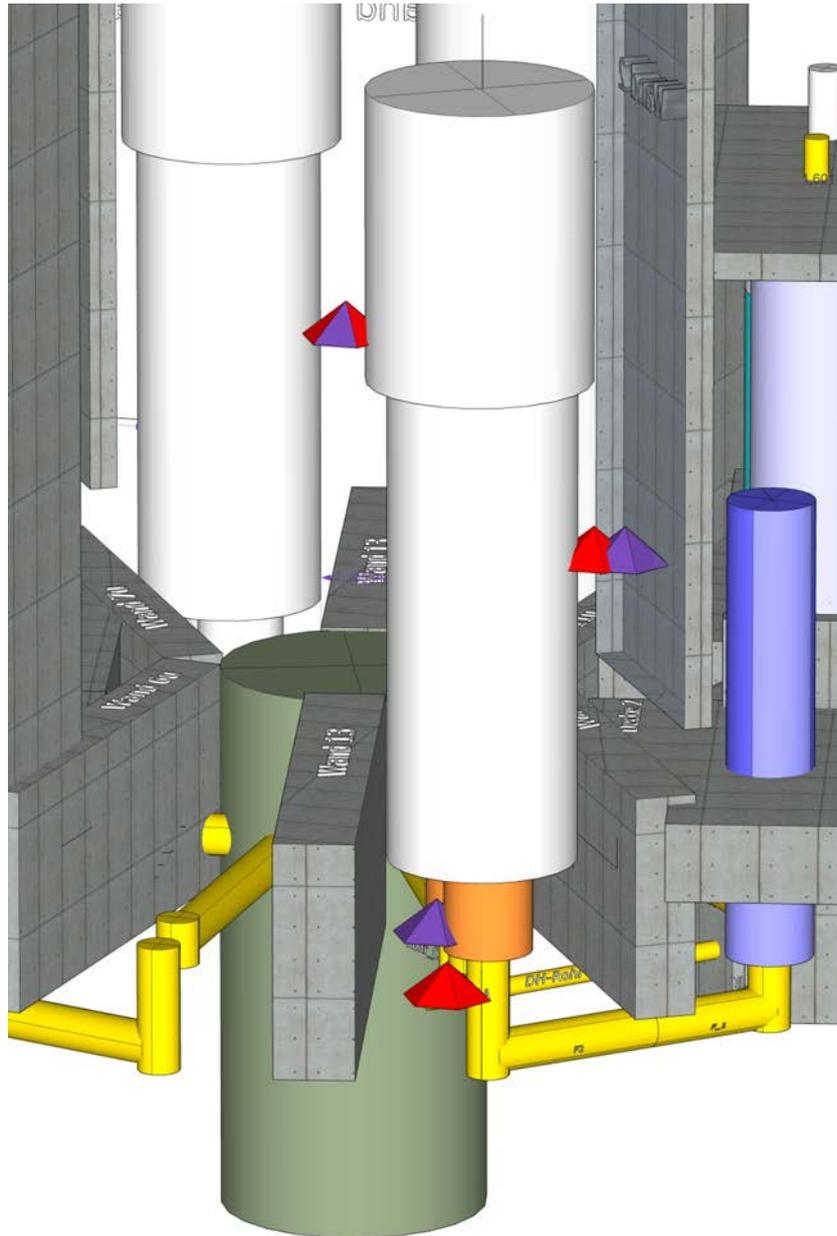


Abb. 4.1 Repräsentative Aufenthaltsorte für die Abbautätigkeit "Dampferzeugerausbau". Die Spitzen der violetten Pyramiden repräsentieren die Vorarbeiten, die roten die Hauptarbeiten

In Abb. 4.1 sind die für die Tätigkeit „Abbau eines Dampferzeugers im Stilllegungsbetrieb“ als relevant erachtete Punkte mit violetten und roten Pyramiden markiert, deren Spitzen den Ort angeben. Die violetten Pyramiden markieren die Orte für die Vorarbeiten, die roten diejenigen für die Hauptarbeiten. Der zweifarbige Aufenthaltsort am Sekundärteil wird gemeinsam benutzt. Auf Grund der Nähe zueinander sind für die ODL-Messpunkte der Vor- und Hauptarbeiten die gleichen Quellen relevant, allerdings in

veränderten Abständen und teilweise unterschiedlich abgeschirmt. Zum einen wird bei den Vorarbeiten eine 1 cm starke Abschirmung aus Blei rund um die DE-Wasserkammern angebracht, die bei den Hauptarbeiten eingesetzt wird (orangefarbener Mantel um die Wasserkammern in der Abbildung). Zum anderen enthält der Dampferzeuger während der Vorarbeiten noch Sekundärwasser um die U-Rohre, was der Abschirmung dient. In der Phase der Hauptarbeiten ist das Sekundärwasser abgelaassen und trägt somit nicht mehr zur Abschirmung bei.

Der benachbarte Dampferzeuger ist bereits abgebaut, wobei die Hauptkühlmittelleitungen noch bestehen. Im unteren Bereich der Dampferzeuger sind diese durch eine sehr starke Betonwand voneinander getrennt. Der Einfluss von Quellen jenseits dieser Wand auf die ODL am unteren Messpunkt ist vernachlässigbar, wie bereits in der Vorläuferstudie ermittelt wurde. Es wird der Abbau des Dampferzeugers betrachtet, welcher über die Volumenausgleichsleitung mit dem Druckhalter verbunden ist (Kreislauf 1 im 3D-Modell).

Als Quellen werden folgende Komponenten(-teile) berücksichtigt:

- Unterer Punkt an den Wasserkammern:
 - Wasserkammern heiße/kalte Seite, DE-U-Rohre, Rohrstücke A, C, D, F2, Volumenausgleichsleitungssegmente 3 und 4.
- Punkt auf halber Höhe des DE:
 - DE-U-Rohre, Rohrstücke D, F2, Volumenausgleichsleitungssegment 3.
- Punkt am Sekundärteil des DE (oben):
 - DE-U-Rohre, Rohrstück D (Kreislauf 1), Rohrstücke A (Kreislauf 2), C (Kreislauf 2), D (Kreislauf 2), Volumenausgleichsleitungssegment 3.

Neben den Aufenthaltsorten, ihren Anteilen und der Festlegung auf die dabei relevanten Quellen und Abschirmungen, ist ferner ein geeigneter Ansatz für den Arbeitsaufwand zu definieren. Im Detail liegt den Autoren nur eine Informationsquelle zum Personalaufwand und Arbeitsstundenaufwand beim DE-Abbau vor. Hierin wird angegeben, dass beim Abbau von vier Dampferzeugern 184 Personen (überwiegend Fremdpersonal) beteiligt waren und insgesamt 9735 Personenstunden Arbeitsaufwand auftrat. In der generischen Umsetzung der Tätigkeit werden gerundete, vergleichbare Werte verwendet:

- Anzahl Dampferzeuger: 4
- Personaleinsatz: 200 Personen
- Arbeitsaufwand: 10000 Personenstunden
- Arbeitszeit je Person: 50 Stunden

Es wird implizit angenommen, dass der viermalige Abbau desselben Dampferzeugers dieselbe Personendosis generiert wie der Abbau von vier verschiedenen Dampferzeugern derselben Anlage. Diese Vorgehensweise wurde bereits in der Vorläuferstudie für die Simulation von Revisionstätigkeiten angewandt. Der resultierende Fehler wurde abgeschätzt und als gering gegenüber den übrigen auftretenden Unsicherheiten befunden. Die Ergebnisse der Tätigkeitssimulation zum DE-Abbau werden in Kapitel 5.1 vorgestellt und diskutiert.

4.3.2 Abbau der Hauptkühlmittelpumpen

Zum Abbau von Hauptkühlmittelpumpen im Rahmen der Stilllegung ist die Datenlage hinsichtlich Informationen zu Personal- und Arbeitsaufwand schlechter als bei dem vorigen Beispiel des DE-Abbaus. Die Informationen hierzu liegen nur für eine Anlage der ersten KWU/Siemens-Generation mit 4 Kreisläufen und nur für einen Teilumfang vor. Auf Basis vollständiger Daten zur Kollektivdosis für den Abbau der vier Hauptkühlmittelpumpen wird, unter Annahme konstant bleibender Tätigkeits-Dosisleistung, auf den Gesamt-Arbeitsaufwand skaliert. Die Personenzahl wird für den Gesamtzeitraum übernommen und gerundet. Im generischen Modell werden entsprechend folgende gerundete Werte verwendet:

- Arbeitsaufwand: 7500 Personenstunden
- Personenzahl: 40
- Arbeitszeit je Person: 187,5 h
- Anzahl der HKMP: 4

Die Personenzahl ist dabei als sehr unsicher anzusehen. Für die Kollektivdosis als Simulationsergebnis ist allerdings die besser abgeschätzte Personenstundenzahl relevant.

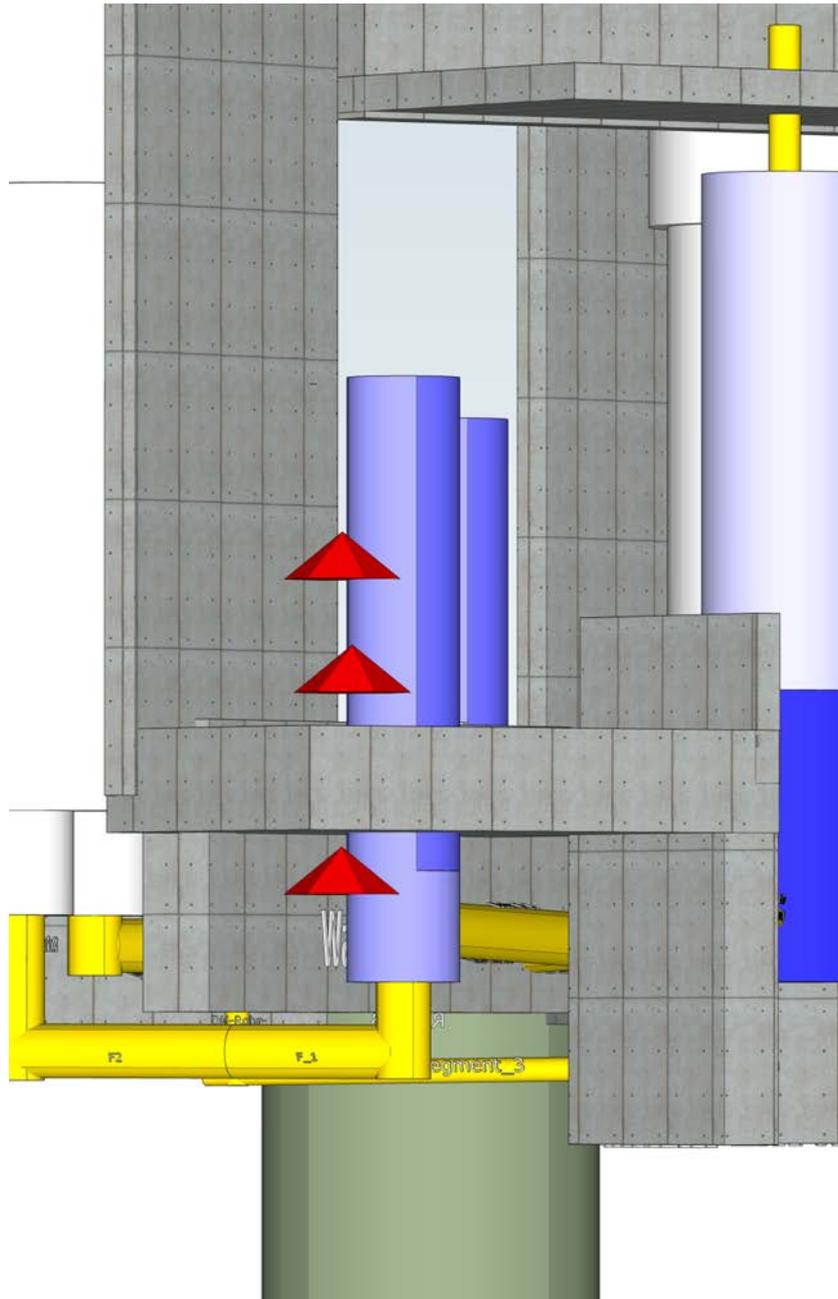


Abb. 4.2 ODL-Messpunkte für die Stilllegungstätigkeit des HKMP-Abbaus

Im Gegensatz zu den Dampferzeugern ist bei den Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) davon auszugehen, dass diese in der Mehrzahl der Anlagen beim Abbau – wie auch in Revisionen – vor Ort in ihre wesentlichen Teilkomponenten zerlegt wird. Das heißt, der Motor wird vom Rest der Pumpe getrennt, das Gehäuse wird geöffnet und der Läufer entnommen. Wie im Beispiel des DE-Abbaus umfasst die Tätigkeit „HKMP-Abbau“ die verschiedensten vorbereitenden und Hauptarbeiten, die von diversen Berufsgruppen ausgeführt werden. Auf Grund der Ähnlichkeit zur Revisionstätigkeit „Hauptkühlmittelpumpen-Inspektion/Wartung/Reparatur“, welche im Vorläufervorhaben /GRS 16/ be-

handelt wurde, werden die dort festgelegten ODL-Messpunkte auch für die Stilllegungstätigkeit „HKMP-Abbau“ verwendet (Abb. 4.2). Der Punkt hinter der Abschirmung wird allerdings nicht betrachtet und stattdessen der Punkt am Pumpenmotor für Wege und Pausen mit verwendet, da an beiden Punkten Ortsdosisleitungen nahe Null vorliegen. Dessen zeitlicher Anteil wird entsprechend vergrößert. Die Ergebnisse in /GRS 16/ haben gezeigt, dass am Pumpenmotor nur geringe ODLen anfallen. Folglich vereinfacht dieser Ansatz das Modell weiter, ohne das Ergebnis stark zu beeinflussen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Zeitanteile der Aufenthalte an den drei Punkten anders verteilt sind, denn für das Zerteilen und Verpacken der vormals wasserführenden Teile wird voraussichtlich mehr Zeit notwendig sein als für den nicht kontaminierten Rest wie etwa für den Motor. Letzterer kann vermutlich direkt „freigemessen“ werden. Für die Abbau- und (Vor-)konditionierungsarbeiten an kontaminierten Pumpenteilen (unterer Punkt) wird deshalb ein Zeitanteil von 50 % veranschlagt, für die beiden anderen Punkte jeweils 25 %.

Auf Basis der Erkenntnisse in /GRS 16/ können einige stärker abgeschirmte oder von den ODL-Messpunkten entferntere Quellen unberücksichtigt bleiben, da diese mit weniger als 0,1 % zur ODL beitragen. Dies gilt besonders für den oberen Punkt am Pumpenmotor.

Es wird die HKMP des ersten Kreislaufes betrachtet, welcher an den Druckhalter grenzt. Als Quellen werden folgende Komponenten(-teile) an den drei repräsentativen ODL-Messpunkten berücksichtigt:

Unterer Punkt nahe am Pumpenläufer:

- DE-Wasserkammern heiße/kalte Seite, DE-U-Rohre, Druckhalter-Unterteil, Rohrstücke A, B, C, D, E1, F1, HKMP-Unterteil, Volumenausgleichsleitung-Segment_3

Punkt auf halber Höhe der HKMP:

DE-Wasserkammern heiße/kalte Seite, DE-U-Rohre, HKMP-Unterteil, Druckhalter-Unterteil

Punkt am Pumpenmotor (oben):

DE-Wasserkammern heiße/kalte Seite, DE-U-Rohre.

Es wird implizit angenommen, dass der viermalige Abbau derselben Hauptkühlmittelpumpe dieselbe Personendosis generiert wie der Abbau von vier verschiedenen Pumpen derselben Anlage. Diese Vorgehensweise wurde bereits oben sowie in der Vorläuferstudie /GRS 16/ erläutert. Die Ergebnisse der Tätigkeitssimulation zum HKMP-Abbau werden in Kapitel 5.2 vorgestellt und diskutiert.

5 Ergebnisse und Diskussion der Simulationen

5.1 Simulation von Revisionstätigkeiten in Konvoi-Anlagen

5.1.1 Simulation von Tätigkeiten an der HKMP

Die Simulation der Revisionstätigkeiten Inspektion, Wartung und Reparatur an den Hauptkühlmittelpumpen erfolgt für Konvoi-Anlagen analog zu der Vorgehensweise für Anlagen älterer Bauart /GRS 16/. An die Spezifika angepasst werden dafür die Nuklidvektoren (s. Kapitel 4.1), die Materialwahl der simulierten Komponenten und der Personalaufwand (Personenzahl), da sich diese signifikant zu den Werten bei Anlagen der Vorgängergeneration unterscheiden. Die Anzahl involvierter Personen für diese Tätigkeit wird auf 100 festgelegt, was einem gerundeten Durchschnittswert entspricht (frühere Werte: 56 bei Generation 3 und 36 bei Generation 2).

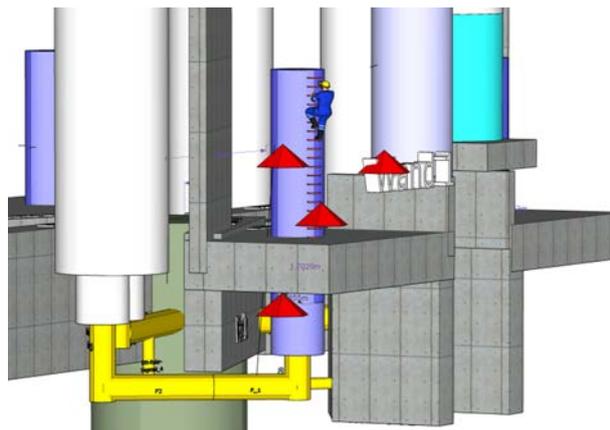


Abb. 5.1 Auswahl der Raumpunkte am Gewerk "Hauptkühlmittelpumpe" (rote Pyramiden), deren Ortsdosisleistung berechnet wird

Mit Hilfe der Software MicroShield werden die Ortsdosisleistungen an den für die Tätigkeit repräsentativen Punkten (siehe Abb. 5.1) einzeln berechnet und aufaddiert. Am abgeschirmten Punkt hinter der (im Bild nicht eingezeichneten) Wand und am Punkt oben am Pumpenmotor liegen Ortsdosisleistungen vor, die im Bereich der natürlichen Radioaktivität liegen. Ebenfalls sehr niedrig ist die ODL in mittlerer Entfernung zu den relevanten Strahlenquellen. Ein Arbeiter erhält hier im Durchschnitt ca. $1 \mu\text{Sv}$ an Dosis während der gesamten Tätigkeitsdauer von 17 h (pro Person). Am Pumpen-Unterteil werden hingegen signifikante Ortsdosisleistungen erzeugt ($11,4 \mu\text{Sv/h}$), die sich wesentlich auf die insgesamt resultierende Tätigkeitsdosis niederschlägt. Diese beträgt je Arbeiter im Durchschnitt $18 \mu\text{Sv}$. Damit wird insgesamt eine tätigkeitsbezogene Kol-

lektivdosis von 1,8 mSv generiert. Die mittlere Tätigkeitsdosisleistung beträgt ca. 1,1 μ Sv/h.

Die Unsicherheit der Simulationsergebnisse beträgt etwa Faktor 2 bzw. 0,5. Sie wird überwiegend bestimmt von der Unsicherheit der Zeitanteile der ODL-Messpunkte, aber auch von den Nuklidvektoren, da diese teilweise auf Basis von einmaligen Messungen an einer einzelnen Anlage aufgestellt wurden. Da die übrigen zwei Konvoi-Anlagen jedoch baugleich sind und aus fast den gleichen Baujahren stammen, wird diese Unsicherheit als vertretbar angesehen.

Verglichen mit den Ergebnissen aus dem Vorläufervorhaben /GRS 16/ für Anlagen der zweiten und dritten Siemens/KWU-Anlagen-Generation, ist die Kollektivdosis für die HKMP-Tätigkeiten in Konvoi-Anlagen deutlich niedriger. Sie beträgt weniger als die Hälfte des Wertes einer Generation-3-Anlage und weniger als ein Drittel im Vergleich zur zweiten Generation (s. Abb. 5.2).

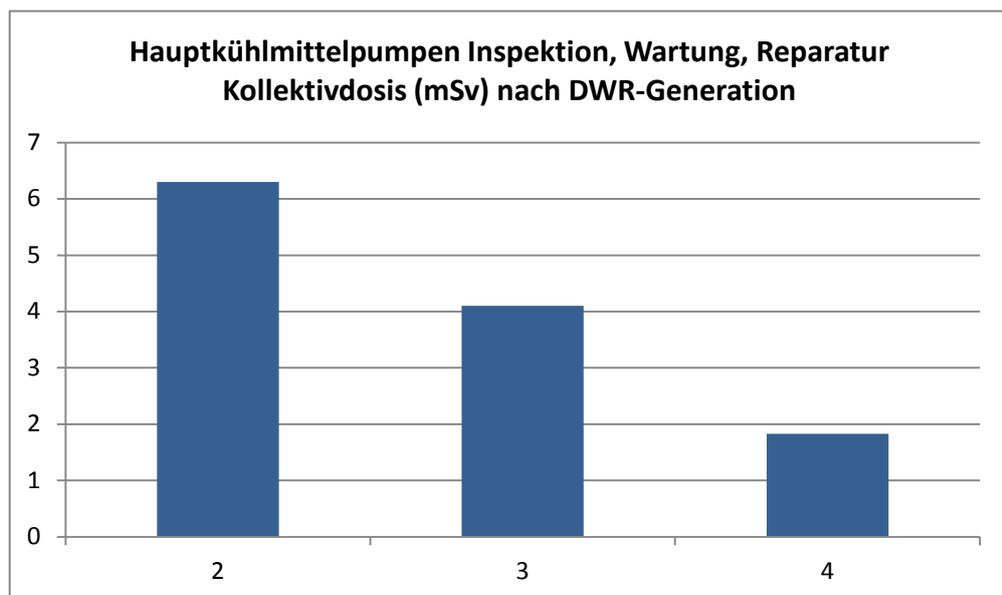


Abb. 5.2 Vergleich der errechneten Kollektivdosen für Tätigkeiten an den HKMP für verschiedenen DWR-Generationen

5.1.2 Simulation der Tätigkeiten am Druckhalter

Die hier simulierte Revisionstätigkeit umfasst sowohl Inspektionen, Wartungen als auch Reparaturen am Druckhalter. Prinzipiell sind dadurch Aufenthalte des Personals an allen möglichen Stellen (außen) am Druckhalter möglich. Der untere Teil des Druckhalters (inkl. Heizrohre) bildet häufig die Quelle mit der höchsten Aktivität. Hinzu kommen

hier als wesentliche Quellen die Segmente der Volumenausgleichsleitung außerhalb der abschirmenden Wände um den Druckhalter. Es kann erwartet werden, dass im Sinne der Dosisminimierung Arbeiten im unteren Bereich des Druckhalters deswegen strahlenschutztechnisch am detailliertesten geplant und optimiert werden, so dass Aufenthaltszeiten minimiert werden können bzw. hier Manipulatoren zur Anwendung kommen. Wie bereits im Vorläufervorhaben erfolgt eine Aufteilung der Aufenthaltszeiten eines durchschnittlichen Arbeiters auf drei Aufenthaltsorte:

- Nahe am Druckhalter, unten: 2 %
- auf mittlerer Höhe: 50 %
- oben, abgeschirmt durch eine Beton-Decke (0,6 m Dicke bei Konvoi): 48 %.

Die jeweils in der nächsten Umgebung befindlichen Quellen werden berücksichtigt und die resultierende Strahlenexposition nach Abschirmung durch Behälterwände und ggfs. Wand- und Deckenkonstruktionen mit Hilfe von MicroShield simuliert und anschließend aufsummiert. Dabei kommt der in Kapitel 4.1 beschriebene Nuklidvektor für Konvoi-Anlagen zum Einsatz und es werden die entsprechenden Materialien und Stärken verwendet. Weitere Details zur Simulation können im Vorläuferbericht /GRS 16/ nachgelesen werden. Die berücksichtigten ODL-Messpunkte sind in Abb. 5.3 dargestellt.

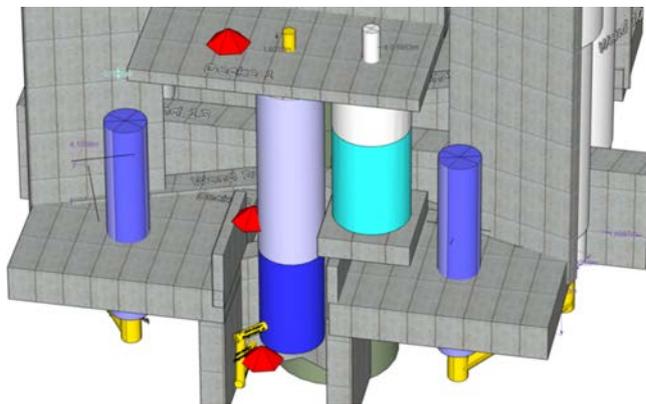


Abb. 5.3 Simulierte ODL-Messpunkte für die Tätigkeiten am Druckhalter

In Konvoi-Anlagen sind im langjährigen Mittel ca. 70 Personen bei dieser Tätigkeit involviert. Je Arbeiter fallen etwa 12 h Arbeitszeit an (insgesamt also 840 Personen-h). Diese Werte wurden durch statistische Auswertung gewonnen.

Die höchste Ortsdosisleistung wird im unteren Bereich des Druckhalters generiert ($175 \mu\text{Sv/h}$), in der Mitte sind es $4,6 \mu\text{Sv/h}$ und im abgeschirmten Bereich

1,3 E-3 $\mu\text{Sv/h}$. Insgesamt beträgt die Job-Dosisleistung 5,8 $\mu\text{Sv/h}$. Die Kollektivdosis für die Tätigkeiten am Druckhalter beläuft sich auf 4,9 mSv, so dass sich eine mittlere Personendosis von 70 μSv ergibt. Die Unsicherheit der Simulationsergebnisse beträgt, wie im vorigen Kapitel erläutert, auch hier etwa Faktor 2 bzw. 0,5.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Vorläufervorhaben /GRS 16/ für Anlagen der zweiten und dritten Siemens/KWU-Anlagen-Generation, ist die Kollektivdosis für die Tätigkeiten am Druckhalter in Konvoi-Anlagen um eine ganze Größenordnung niedriger (s. Abb. 5.4).

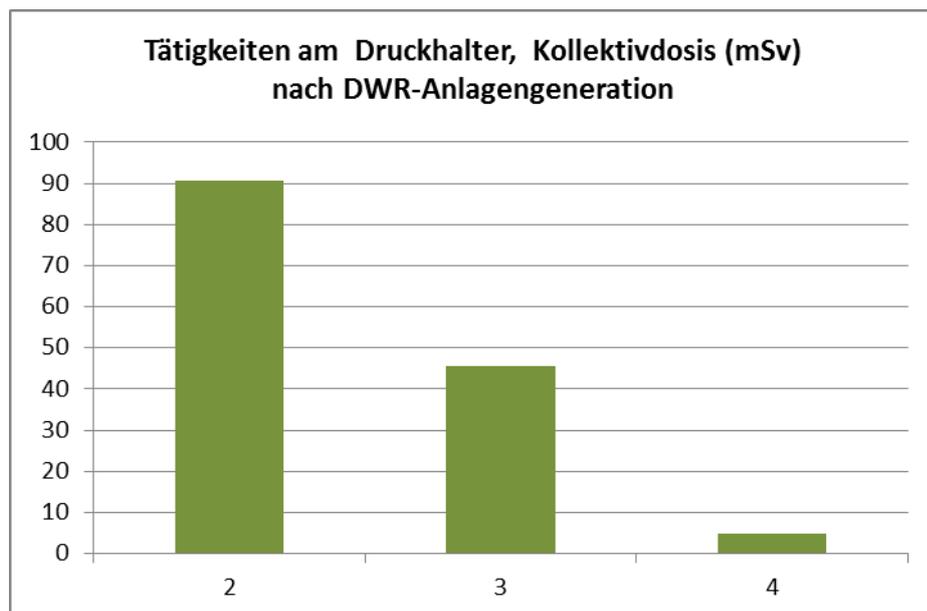


Abb. 5.4 Vergleich der errechneten Kollektivdosen für Tätigkeiten am Druckhalter für verschiedenen DWR-Generationen

5.1.3 Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger

Für die Simulation der Revisionstätigkeit „Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger“ werden zwei Punkte berücksichtigt, von denen der eine abgeschirmt ist und einen Rückzugsort, der Wege oder Arbeiten mittels Manipulator repräsentieren soll. Der zweite Punkt in mittlerer Entfernung zu relevanten Strahlenquellen (1-2 m) repräsentiert Arbeiten zur Einrichtung eines Manipulators und sonstige Vor- und Nachbereitungstätigkeiten. Arbeiten durch das Personal in unmittelbarer Nähe finden seit rund 15 Jahren bei dieser speziellen Tätigkeit nicht mehr statt. Deshalb wird – im Gegensatz zu anderen hier dargestellten Tätigkeiten – auf einen ODL-Messpunkt im Nahbereich verzichtet.

Die Aufteilung der Aufenthalte wird wie folgt gewählt (analog zu den Anlagen älterer Generationen):

- In mittlerer Entfernung: 5 %
- Im abgeschirmten Bereich: 95 %.

An den jeweiligen Punkten werden die Strahlenquellen in der direkten Umgebung berücksichtigt. Weiter entfernt liegende können vernachlässigt werden, wie im Vorläufervorhaben nachgewiesen wurde /GRS 16/. Unter Anwendung der Konvoi-spezifischen Nuklidvektoren und der entsprechenden Materialwahl der Komponenten werden die Ortsdosisleistungen an den Messpunkten unter ansonsten zu /GRS 16/ unveränderten Bedingungen mittels MicroShield simuliert und schließlich aufsummiert. Die Unsicherheit der Simulationsergebnisse beträgt, wie bereits erläutert, auch hier etwa Faktor 2 bzw. 0,5.

Im abgeschirmten Bereich wird trotz der nur 0,6 m dicken abschirmenden Betonwand eine vernachlässigbare Ortsdosisleistung ermittelt (0,004 $\mu\text{Sv/h}$). Die ODL auf mittlerer Höhe des Dampferzeugers beträgt 130 $\mu\text{Sv/h}$. daraus resultiert eine Tätigkeitsdosisleistung von 6,5 $\mu\text{Sv/h}$. Bei durchschnittlich 14 h Arbeitszeit je Arbeiter entfallen auf diesen rund 91 μSv mittlere Personendosis. Die Kollektivdosis bei 30 involvierten Personen beträgt 2,7 mSv für die gesamte Durchführung einer Wirbelstromprüfung an einem Dampferzeuger.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Vorläufervorhaben /GRS 16/ für Anlagen der zweiten und dritten Siemens/KWU-Anlagen-Generation, ist die Kollektivdosis für die Tätigkeit „Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger“ in Konvoi-Anlagen um mehr als eine Größenordnung niedriger (s. Abb. 5.5).

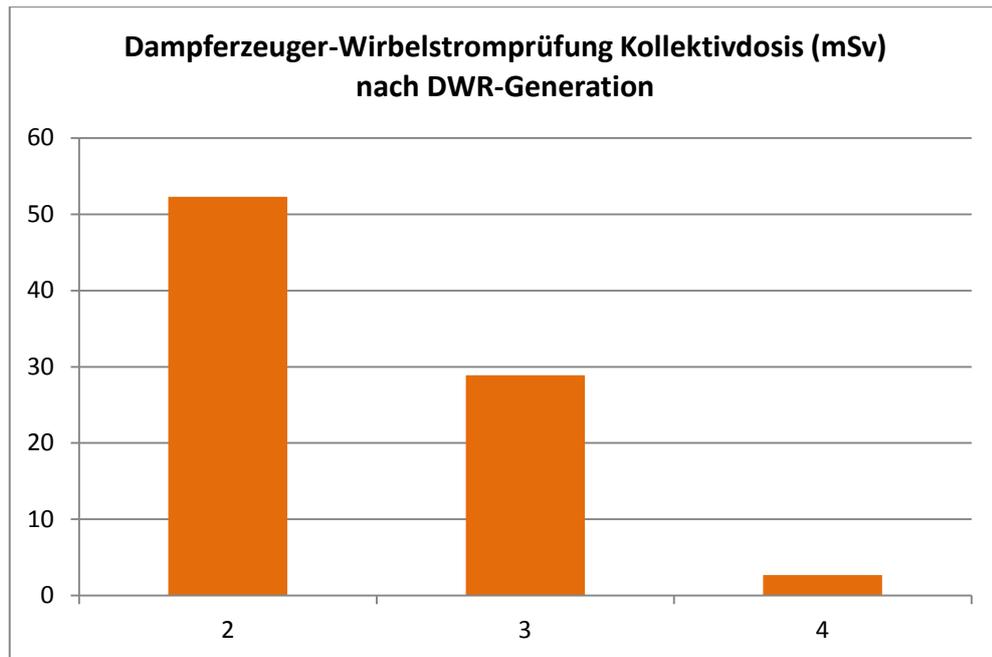


Abb. 5.5 Vergleich der errechneten Kollektivdosen für die Tätigkeit „Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger“ für verschiedenen DWR-Generationen

5.1.4 Diskussion der Simulationsergebnisse für Revisionstätigkeiten in Konvoi-Anlagen

Die drei ausgewählten Revisionstätigkeiten an der Hauptkühlmittelpumpe, am Druckhalter und die Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger sind regelmäßig stattfindende Tätigkeiten, für die eine verhältnismäßig große Datenbasis (z. B. in Form der ISOE-Datenbank) vorliegt. Aus diesem Grund können die Ergebnisse der Simulationen mit gemessenen Werten verglichen werden. Die bereits im Vorläufervorhaben erhobenen Daten (1999 – 2012) wurden bis einschließlich Jahrgang 2016 erweitert.

Um die simulierten Ergebnisse besser im Vergleich zu den Messdaten einordnen zu können, wurden von Job-Dosisleistung, Kollektivdosis und mittlerer Personendosis für die drei Tätigkeiten

- die Minima und Maxima der Anlagen-Durchschnittswerte,
- die absoluten Minima und Maxima über alle Konvoi-Anlagen und
- die Mittelwerte über alle Konvoi-Anlagen

über die Jahre 1999 bis 2016 bestimmt. Die in den einzelnen Abschnitten weiter oben bereits genannten Simulationsergebnisse werden zum direkten Vergleich tabellarisch

aufgeführt (siehe Tab. 5.1). Es wird darauf hingewiesen, dass nicht alle Tätigkeiten in allen Revisionen durchgeführt werden. Außerdem liegen zum Teil Daten über den Personalaufwand nicht vor, so dass die daraus abgeleitete Größe „mittlere individuelle Personendosis“ nicht ermittelbar ist und somit nicht in die Statistik einfließen kann. Die Anzahl involvierter Elemente, d. h. die Anzahl an Pumpen oder Dampferzeugern wird in ca. der Hälfte der Fälle nicht angegeben. In diesen Fällen wird ein Mittelwert der Anzahl herangezogen (2,182 Dampferzeuger und 1,684 Hauptkühlmittelpumpen). Diese Anzahlen gehen in die Statistik ein, da die Dosen auf jeweils ein Element bezogen werden müssen um sie mit der Simulation vergleichbar zu machen. Aus den genannten Gründen sind auch die abgeleiteten Messgrößen mit einer (zusätzlichen) Unsicherheit behaftet. Die Einzelwerte unterliegen von Jahr zu Jahr und von Anlage zu Anlage ohnehin erheblichen Schwankungen; die Minima und Maxima in Tab. 5.1 geben einen Hinweis darauf. Die Simulationsergebnisse zu den Revisionstätigkeiten stimmen im Rahmen der Unsicherheiten (ca. Faktor 2 nach oben und 0,5 nach unten) gut mit den Mittelwerten der Messungen überein und ordnen sich im mittleren bis unteren Wertebereich der Einzelwerte ein.

Damit ist gezeigt, dass das generische Modell auch für Konvoi-Anlagen plausible Ergebnisse im zu erwartenden Rahmen liefert, wie dies bereits in /GRS 16/ für DWR der Vorgängergeneration der Fall war. Es können somit weiter gehende Simulationen durchgeführt werden um Prognosen über zu erwartende Personendosen bei weniger gut dokumentierten Tätigkeiten zu erstellen. Tätigkeiten dieser Art sind zum Beispiel Abbautätigkeiten im Rahmen einer Stilllegung, von denen der Abbau von Dampferzeuger und Hauptkühlmittelpumpe gut modellierbare Einzelprojekte sind. Diese werden im folgenden Kapitel für Anlagen der Generationen 2, 3 und 4 von DWR simuliert und diskutiert.

Tab. 5.1 Einordnung der Simulationsergebnisse im Vergleich zu tatsächlichen Messwerten für Konvoi-Anlagen

Größe [Einheit]	Ergebnis der Simulation	Mittelwert ³			Einzelwerte ⁴	
		Über alle Konvoi- Anlagen	kleinster	größter	absolutes Minimum	absolutes Maximum
Tätigkeiten an einer Hauptkühlmittelpumpe						
Dosisleistung HKMP [$\mu\text{Sv/h}$]	1,1	2,0	1,5	2,7	0,1	6,0
individuelle Personendo- sis [$\mu\text{Sv/Person}$]	18	33	23	41	6,5	93,6
Kollektivdosis [Pers.mSv]	1,83	3,0	2,0	3,8	0,2	9,5
Tätigkeiten am Druckhalter						
Dosisleistung [$\mu\text{Sv/h}$]	5,84	4,1	2,9	7,2	0,8	22,1
individuelle Personendo- sis [$\mu\text{Sv/Person}$]	70	47	53	84	8	393
Kollektivdosis [Pers.mSv]	4,9	3,2	2,4	4,0	0,2	14,8
Wirbelstromprüfung an einem Dampferzeuger						
Dosisleistung DE [$\mu\text{Sv/h}$]	6,47	9,3	7,6	11,0	0,02	19,0
individuelle [$\mu\text{Sv/Person}$]	91	135	111	186	0,2	397
Kollektivdosis [Pers.mSv]	2,7	2,6	1,8	3,1	0,0005	6,6

5.2 Simulation der Stilllegungstätigkeit „DE-Abbau“

Die umfangreiche Tätigkeit „Abbau von Dampferzeugern“ im Rahmen der Stilllegung eines Kernkraftwerkes wird entsprechend den Angaben im Kapitel 4.1 und 4.3 simuliert. Es wird angenommen, dass die Vorgehensweise für alle Anlagengenerationen gültig ist und sich Stundenumfang und Personaleinsatz nicht signifikant unterscheiden.

³ Es wurde für jede der drei Konvoi-Anlagen ein mehrjähriger Mittelwert berechnet. Der kleinste/größte ist ein Mittelwert für jeweils **eine** bestimmte dieser drei Anlagen, z.B. KKE.

⁴ Es sind Einzelwerte aus Revisionen der letzten 17 Jahre angegeben, die aus allen drei Konvoi-Anlagen stammen können.

Zwischen Anlagen der zweiten, dritten und vierten KWU/Siemens-Generation wird bei der Simulation durch die Wahl des Nuklidvektors und der eingesetzten Werkstoffe im abschirmenden Material differenziert. Unterschiede im Arbeitsaufwand, die etwa durch verschiedene Platzverhältnisse und Zwischenlagermöglichkeiten entstehen können, werden nicht berücksichtigt, da hierfür keine belastbaren Daten vorliegen. Es wird jeweils der Nuklidvektor für die Situation fünf Jahre nach der letzten Abschaltung sowie bei Generation-2- und 3-Anlagen nach einer Systemdekontamination aller simulierten Komponenten eingesetzt. Einer zeitlichen Aufteilung von 3 %, 50 % und 47 % jeweils für den unteren, mittleren und oberen Aufenthaltspunkt wird als Standard-Annahme verwandt, die für alle Anlagengenerationen gleichermaßen gilt. Im generischen Modell aller Anlagengenerationen sind 200 Personen beteiligt. 2/3 der Arbeitszeit entfällt auf die Vorarbeiten, 1/3 auf die Hauptarbeiten.

5.2.1 DE-Abbau in Anlagen der zweiten KWU/Siemens-Generation

Mit Hilfe der Software MicroShield werden die Ortsdosisleistungen an den drei repräsentativen Aufenthaltsorten bei den Vorbereitungen und an den drei für die Hauptarbeiten repräsentativen Raumpunkten am Dampferzeuger berechnet und anschließend summiert.

Für die **Vorarbeiten** ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 0,13 mSv/h (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 1,5 µSv/h (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,7 µSv/h (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2 sowie dem Segment 3 der Volumenausgleichsleitung).

Es ergibt sich eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von 167 µSv. Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 5 µSv/h. Die Kollektivdosis der Vorarbeiten beträgt damit insgesamt 33,5 mSv.

Für die **Hauptarbeiten** ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 28 µSv/h (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden und Rohr A)

- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 2,1 $\mu\text{Sv/h}$ (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,72 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2, Rohr C (Kreislauf 2)).

Es ergibt sich eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von 37 μSv . Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 2,2 $\mu\text{Sv/h}$. Bei 200 beteiligten Personen bzw. einem Drittel von 10000 Personenstunden beträgt die Kollektivdosis der Hauptarbeiten 7,5 mSv.

In Summe beträgt die Kollektivdosis für den Abbau von vier Dampferzeugern in einer Anlage der zweiten Generation rund 41 mSv. Die gesamte mittlere tätigkeitsbezogene ODL beträgt 4,1 $\mu\text{Sv/h}$. Die mittlere tätigkeitsbezogene Dosis eines Arbeiters beträgt 205 μSv .

Wie in Kapitel 4.3.1 angegeben, können die zeitlichen Anteile der Arbeiten in den Bereichen hoher, mittlerer und niedriger ODL innerhalb gewisser Grenzen variieren. Diese Grenzen markieren die Ränder der möglichen Schwankungsbreite der Simulation. Die geringste in diesem Rahmen zu erwartende Kollektivdosis beträgt 30 mSv. Maximal können 106,5 mSv auftreten. Die kleinste zu erwartende mittlere individuelle Personendosis beträgt 150 μSv , das Maximum liegt bei 532 μSv .

5.2.2 DE-Abbau in Anlagen der dritten KWU/Siemens-Generation

Es wird analog zu Anlagen der zweiten Generation verfahren (s. Kap. 5.2.1).

Für die **Vorarbeiten** ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 65,8 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 0,85 $\mu\text{Sv/h}$ (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,6 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2 sowie dem Segment 3 der Volumenausgleichsleitung).

Die resultierende Gesamtdosis je Arbeiter ergibt sich zu 89,5 μSv . Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 2,7 $\mu\text{Sv/h}$, die Kollektivdosis der Vorarbeiten beträgt 17,9 mSv.

Für die **Hauptarbeiten** ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 12,6 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden und Rohr A)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 1,1 $\mu\text{Sv/h}$ (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,62 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2, Rohr C (Kreislauf 2)).

Die Gesamtdosis je Arbeiter berechnet sich damit zu 20,5 μSv . Die Tätigkeitsdosisleistung beträgt rund 1,2 $\mu\text{Sv/h}$, die Kollektivdosis für die Hauptarbeiten 4,1 mSv.

In Summe beträgt die Kollektivdosis für den Abbau von vier Dampferzeugern in einer Anlage der dritten Generation rund 22 mSv. Die gesamte mittlere tätigkeitsbezogene ODL beträgt 2,2 $\mu\text{Sv/h}$. Die mittlere tätigkeitsbezogene Dosis eines Arbeiters beträgt 110 μSv .

Wie in Kapitel 4.3.1 angegeben, können die zeitlichen Anteile der Arbeiten in den Bereichen hoher, mittlerer und niedriger ODL innerhalb gewisser Grenzen variieren. Diese Grenzen markieren wesentlich die Ränder der möglichen Schwankungsbreite der Simulationsergebnisse. Die geringste in diesem Rahmen zu erwartende Kollektivdosis beträgt 16,8 mSv. Maximal können 54,1 mSv auftreten. Die kleinste zu erwartende mittlere individuelle Personendosis beträgt 84 μSv , das Maximum liegt bei 270 μSv .

5.2.3 DE-Abbau in Anlagen der vierten KWU/Siemens-Generation (Konvoi)

Im Unterschied zu den Abbautätigkeiten bei Anlagen der zweiten und dritten Generation, kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass der Abbau von Großkomponenten in allen Fällen nach erfolgter Systemdekontamination erfolgen wird. Die Simulation des DE-Abbaus in einer Konvoi-Anlage erfolgt an dieser Stelle zunächst mit dem Nuklidvektor, wie er fünf Jahre nach Abschaltung der Anlage erwartet wird, d. h. ohne zuvor durchgeführte Systemdekontamination. Anhand des Ergebnisses kann anschließend bewertet werden, ob eine FSD vorausgehend zum Abbau der Dampferzeuger sinnvoll erscheint oder ob die radiologischen Vorteile vernachlässigbar klein sind.

Mit Hilfe der Software MicroShield werden die Ortsdosisleistungen an den drei repräsentativen Aufenthaltsorten bei den Vorbereitungen und an den drei für die Hauptarbeiten repräsentativen Punkten am Dampferzeuger berechnet und anschließend addiert.

Für die Vorarbeiten ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 1,95 mSv/h (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 1,2 µSv/h (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,7 µSv/h (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2 sowie dem Segment 3 der Volumenausgleichsleitung).

Es ergibt sich eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von ca. 2,0 mSv. Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 60 µSv/h. Damit liegt die Kollektivdosis der Vorarbeiten bei 396,0 mSv.

Für die **Hauptarbeiten** ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 121 µSv/h (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden und Rohr A)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 1,3 µSv/h (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,7 µSv/h (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2, Rohr C (Kreislauf 2)).

Die mittlere Gesamtdosis je Arbeiter bei den Hauptarbeiten berechnet sich zu 77 µSv. Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 4,6 µSv/h. damit liegt die Kollektivdosis für die Hauptarbeiten bei 15,5 mSv.

In Summe beträgt die Kollektivdosis für den Abbau von vier Dampferzeugern in einer Anlage der vierten Generation rund 411 mSv. Die gesamte mittlere tätigkeitsbezogene ODL beträgt 41 µSv/h. Die mittlere tätigkeitsbezogene Dosis eines Arbeiters beträgt 2,1 mSv.

Wie erwähnt, können die zeitlichen Anteile der Arbeiten in den Bereichen hoher, mittlerer und niedriger ODL innerhalb gewisser Grenzen variieren. Diese Grenzen markieren die Ränder der möglichen Schwankungsbreite der Simulation. Die geringste in diesem Rahmen zu erwartende Kollektivdosis beträgt 278 mSv. Maximal können 1,3 Sv auftreten. Die kleinste zu erwartende mittlere individuelle Personendosis beträgt 1,4 mSv, das Maximum liegt bei 6,7 mSv.

Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen der DE-Abbautätigkeit in Anlagen der zweiten und dritten Generation ist festzustellen, dass die Dosen und Dosisleistungen erheblich höher ausfallen. Es liegt rund eine Größenordnung zwischen Konvoi und generischer Generation-2-Anlage, in welcher vor dem Abbau eine FSD durchgeführt wurde. Auf Grund dieses Resultates erscheint es aus radiologischer Sicht als sinnvoll, auch in Konvoi-Anlagen eine Dekontamination des Primärkreislaufs vor dem Abbau durchzuführen. Deshalb wird die Simulation mit verändertem Nuklidvektor wiederholt. Dieser berücksichtigt zusätzlich zur 5-jährigen Abklingzeit eine im Anschluss erfolgte Systemdekontamination (s. Kap. 4.1).

5.2.3.1 DE-Abbau in Konvoi-Anlagen mit zuvor durchgeführter FSD

Der Nuklidvektor für Konvoi-Anlagen in Stilllegung mit zuvor durchgeführter Systemdekontamination ist in Kap. 4.1 aufgeführt. Dieser leitet sich aus dem Revisions-Nuklidvektor durch eine fünfjährige Abklingzeit und komponentenabhängigen Dekontaktoren (30, 60 und 120) ab. Die Simulation erfolgt ansonsten wie zuvor.

Für die **Vorarbeiten** ergeben sich die folgenden, deutlich niedrigeren Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 16,2 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 0,04 $\mu\text{Sv/h}$ (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,02 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2 sowie dem Segment 3 der Volumenausgleichsleitung).

Es ergibt sich für die Vorarbeiten eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von 17,0 μSv . Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 0,5 $\mu\text{Sv/h}$. Die Kollektivdosis der Vorarbeiten ergibt sich damit zu 3,4 mSv.

Für die **Hauptarbeiten** ergeben sich die folgenden Ortsdosisleistungen:

- Unterer Punkt an Wasserkammern: 1,3 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Quellen, die durch die Wasserkammern selbst gebildet werden und Rohr A)
- Punkt auf mittlerer Höhe des DE: 0,04 $\mu\text{Sv/h}$ (vergleichbare, geringe ODL-Beiträge von allen umliegenden Quellen)
- Punkt oben am Sekundärteil des DE: 0,02 $\mu\text{Sv/h}$ (bestimmt von den Rohren D der Kreisläufe 1 und 2, Rohr C (Kreislauf 2)).

Für die Hauptarbeit der Tätigkeit ergibt sich eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von 1,2 μSv . Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ und die Kollektivdosis der Hauptarbeiten liegt damit bei 230 μSv .

In Summe beträgt die Kollektivdosis für den Abbau von vier Dampferzeugern in einer Anlage der vierten Generation rund 3,7 mSv. Die gesamte mittlere tätigkeitsbezogene ODL beträgt 0,37 $\mu\text{Sv/h}$. Die mittlere tätigkeitsbezogene Dosis eines Arbeiters beträgt 18,3 μSv .

Innerhalb der Schwankungsbreite der zeitlichen Anteile repräsentativer Aufenthalte liegt die geringste in diesem Rahmen zu erwartende Kollektivdosis bei 188 μSv . Maximal können 11 mSv auftreten. Die kleinste zu erwartende mittlere individuelle Personendosis beträgt 12,7 μSv , das Maximum liegt bei 57,5 μSv .

Auf Grund der Ergebnisse erscheint es aus radiologischer Sicht sinnvoll vor dem Abbau von Konvoi-Anlagen auch in diesen eine Systemdekontamination durchzuführen. In der Gesamtschau geht die prognostizierte Kollektivdosis für den DE-Abbau je nach Anlagengeneration deutlich zurück. Von Generation 2 zu Generation 3 wird beinahe eine Halbierung der Dosis erwartet. In Konvoi-Anlagen liegt die Prognose bei einer Reduktion auf weniger als 10 % der Generation-2-Dosis. Die prognostizierten Kollektivdosen sind in Abb. 5.6 veranschaulicht.

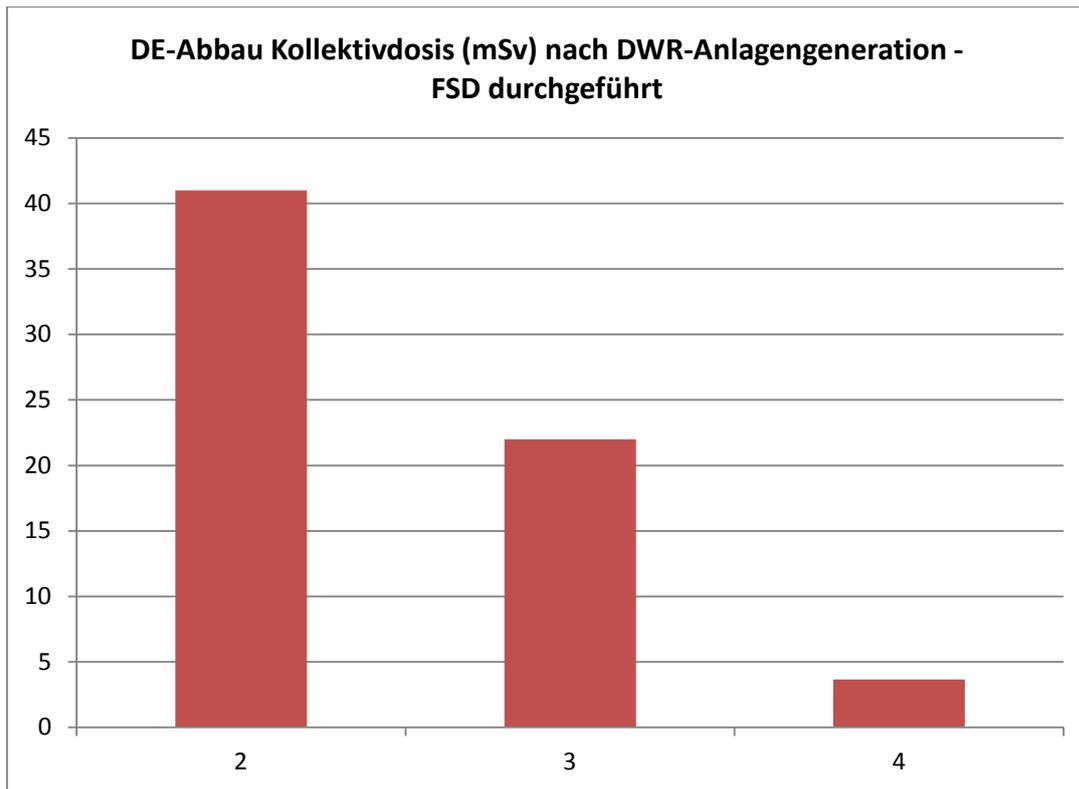


Abb. 5.6 Simulierte Kollektivdosis beim Abbau eines Dampferzeugers für verschiedene DWR-Generationen

5.2.4 Diskussion der Simulationsergebnisse zum Abbau von Dampferzeugern

Der Abbau von Dampferzeugern im Rahmen von Stilllegungsmaßnahmen nach einem langjährigen Regelbetrieb und rund fünf Jahre nach letztmaliger, geplanter Abschaltung hat in Deutschland bisher in zwei Anlagen der ersten Generation stattgefunden. Diese unterscheiden sich in ihrer Leistung bzw. in der Anzahl ihrer Kühlkreisläufe von der generisch betrachteten 4-Loop- und ca. 1200 MW-Klasse. Die Querschnitte der Hauptkühlmittelleitungen sowie die verwendeten Pumpentypen und Dampferzeuger sind allerdings vergleichbar mit denen in Anlagen der KWU/Siemens-Generationen 2 bis 4.

Vergleichsanlage 1 besitzt rund die Hälfte der Leistung der „generischen“ Anlage, dabei jedoch – wie diese – vier Kühlkreisläufe. Vergleichsanlage 2 besitzt rund ein Viertel der Leistung der „generischen“ Anlage bei zwei Kühlkreisläufen.

In Vergleichsanlage 1 wurde für den Abbau der vier Dampferzeuger eine Tätigkeitsdosis von 32,4 mSv ermittelt. Die mittlere Job-ODL betrug 3,3 μ Sv/h. Der Personalaufwand (ca. 10000 Personenstunden bei ca. 200 Personen) entspricht in etwa demjenigen im Modell, denn diese Anlage wurde als Referenz zur Festlegung des Arbeitsaufwandes herangezogen. Im Vergleich dazu liefert das generische Modell (für Generation-2-Anlagen mit 4 Loops) für den angenommenen Standardfall 40,9 mSv (im Rahmen der Unsicherheit der Modellannahmen: 30,1 bis 106,5 mSv) Kollektivdosis bei einer mittleren Job-ODL von 4,1 μ Sv/h (Im Rahmen der Unsicherheit der Modellannahmen: 3,1 bis 10,9 μ Sv/h). Im Rahmen der Unsicherheit des Modells stimmen die realen Messdaten gut mit dem Ergebnis der Simulation überein.

Für Vergleichsanlage 2 liegen den Autoren nicht die vollständigen mit der Tätigkeit des DE-Abbaus verbundenen Daten vor. Der Teilumfang innerhalb eines Kalenderjahres für den Abbau der beiden Dampferzeuger verursachte eine Kollektivdosis von 4,93 mSv. Wie groß die Kollektivdosis aus den restlichen Teilumfängen der Abbautätigkeit ist, bleibt offen. Über den Arbeitsaufwand (Personenzahl und –stunden) liegen aktuell keine Informationen vor.

Skaliert man die Teilkollektivdosis mit der Anzahl an Kühlkreisläufen (und damit auch etwa mit der Leistung von Vergleichsanlage 1) ergäbe sich eine Kollektivdosis von rund 10 mSv für vier DE. Unterstellt man weiterhin eine proportionale Skalierung der Dosis mit der Reaktorleistung, so dass dann 20 mSv (bei rund 1200 MW) generiert würden, wäre die Kollektivdosis noch immer niedriger als vom Modell prognostiziert (mindestens 30,1 mSv). Auf Grund der sehr unterschiedlichen Leistungen von generischer Anlage und Vergleichsanlage 2 und anderer baulicher Voraussetzungen (nur 2 Loops, d. h. mehr Raum im Demontagebereich) und der unbekanntem, noch weiteren Kollektivdosen ist die Vergleichbarkeit ohnehin fraglich. Die Größenordnungen von Mess- und Simulationsdaten stimmen dennoch überein.

Bei den beiden Beispiel-Abbauprojekten kann des Weiteren die Abbau-Reihenfolge verschieden sein, so dass die radiologischen Voraussetzungen, also das Vorhandensein von Strahlenquellen, nicht unbedingt vergleichbar sein müssen. Die in beiden Anlagen vor dem Abbaubeginn durchgeführten Systemdekontaminationen erbrachten unterschiedliche systemabhängige Dekontfaktoren. Der (Generation-2)-Nuklidvektor im generischen Modell verwendet gemittelte Dekontfaktoren von einer größeren Anzahl Anlagen.

Eine weitere systematische Unsicherheit beim Vergleich von Messdaten bezüglich Abbautätigkeiten besteht darin, dass diese nicht im ISOE-System definiert sind. Stille-

gungstätigkeiten sind in ihrer Gesamtheit definiert, ebenso verschiedene Berufsgruppen, jedoch nicht der Abbau bestimmter Komponenten. Finden sich dennoch (freiwillige) Angaben in Betreiberberichten dazu (wie in den Beispielen), kann die Tätigkeit auch leicht unterschiedlich definiert sein.

Informationen zu Personalaufwand und Strahlenexposition beim Austausch von Dampferzeugern während der Revision wurden von französischen Betreibern und Dienstleistern veröffentlicht /BON 16/, /SCH 16/. Demnach sind daran etwa sechsmal so viele Personen beteiligt wie bei den DE-Abbautätigkeiten in Deutschland. Die Personenstunden sind etwa um das Acht- bis Zehnfache höher (bis 100.000 gegenüber 10.000 beim Abbau). Die Kollektivdosen für den DE-Austausch liegen im Bereich von 500 Pers. mSv und sind damit rund 1,5 Größenordnungen höher als beim hier betrachteten DE-Abbau. Die höhere Kollektivdosis beim DE-Austausch wird folglich vom größeren Zeit- und Personalaufwand bestimmt. Dies erklärt sich dadurch, dass vor dem Abbau in der Regel zwar das ODL-Niveau durch Systemdekontaminationen gesenkt wird, wohingegen für den Austausch große Mengen an zusätzlicher temporärer Abschirmung angebracht werden, wobei deren Zeitaufwand und Strahlenexposition zur Austauschfähigkeit hinzugezählt werden.

Im generischen Modell wird der Dampferzeuger des ersten Kreislaufes betrachtet, dessen Kühlmittelleitungen mit der Volumenausgleichsleitung vom Druckhalter verbunden sind. Die Leitungssegmente der Volumenausgleichsleitung bilden Quellen, die eigentlich nicht bei allen DE zu berücksichtigen sind. Berücksichtigt man die Volumenausgleichsleitung nur für einen von vier Dampferzeugern, sinkt die Kollektivdosis im Falle der Standardannahmen für Generation-2-Anlagen von 40,9 mSv auf 39,1 mSv. Der in Kauf genommene systematische Fehler beträgt damit 4,5 % und ist im Vergleich zu den Unsicherheiten auf Grund der Zeitverteilung der Aufenthalte an den Quellen vernachlässigbar. Andererseits wird bei dieser, wie bei allen betrachteten Tätigkeiten der radiologische Einfluss des Not- und Nachkühlsystems systematisch vernachlässigt, was eine geringe Unterschätzung der resultierenden Dosis zur Folge hat. Der systematische Fehler, der hierdurch entsteht, kann nicht genau angegeben werden, aber er kompensiert die oben erwähnte Überschätzung der ODL.

Die verfügbaren Messdaten von Generation-1-Anlagen sind mit den Simulationen für jede neuere Generation weniger vergleichbar, insbesondere Auf Grund anderer Nuklidvektoren und einer anderen Anlagenhistorie. Die durch Simulation ermittelten Dosen in Generation-3- und insbesondere Generation-4-Anlagen sind Prognosewerte, die auf

Annahmen basieren, die sich wiederum auf DE-Abbauprojekte in Altanlagen stützen. Während der Abbau der älteren Anlagen (Stand 2017) bereits weit fortgeschritten ist, ist ein Abbaubeginn von Konvoi-Anlagen nicht vor 2023 zu erwarten. Folglich liegen zwischen den DE-Abbau-Projekten von Generation-1-Anlagen und Konvoi-Anlagen rund 20 Jahre. Ob die Annahmen für die Modellierung noch realistisch sind, hängt beispielsweise auch von dem zwischenzeitlichen technologischen Fortschritt und von Veränderungen in der Gesetzeslage ab. Die damit verbundene Unsicherheit in der Gesamtrechnung kann nicht numerisch angegeben werden.

5.3 Simulation der Stilllegungstätigkeit „HKMP-Abbau“

Die Stilllegungstätigkeit „HKMP-Abbau“ wird entsprechend den Angaben im Kapitel 4.3.2 simuliert. Es wird angenommen, dass die Vorgehensweisen für alle Anlagengenerationen gültig sind und sich in Stundenumfang (7500 Personenstunden) und Personaleinsatz (40 Personen) nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die zeitliche Aufteilung von 50 %, 25 % und 25 % jeweils für den unteren, mittleren und oberen Aufenthaltspunkt wird ebenfalls konstant gehalten und zur Bestimmung der Unsicherheiten variiert. Zwischen den Anlagengenerationen wird bei der Simulation durch die Wahl des Nuklidvektors und der eingesetzten Werkstoffe und Dicke des abschirmenden Materials differenziert. Es wird jeweils der Nuklidvektor für die Situation fünf Jahre nach der letzten Abschaltung sowie nach einer Systemdekontamination aller simulierten Komponenten eingesetzt.

5.3.1 HKMP-Abbau in Anlagen der zweiten KWU/Siemens-Generation

Mit Hilfe der Software MicroShield werden die Ortsdosisleistungen an den drei repräsentativen Aufenthaltsorten an der Hauptkühlmittelpumpe für die einzelnen Quellen berechnet und anschließend summiert.

Sowohl am Punkt nahe des Pumpenmotors als auch auf mittlerer Höhe oberhalb der Decke der 10 m-Ebene sind die Ortsdosisleistungen vernachlässigbar und liegen deutlich unterhalb der Werte der natürlichen Strahlenexposition. Die Werte werden daher hier nicht gesondert aufgeführt.

Signifikante Ortsdosisleistung wird dagegen im unteren Bereich der Pumpe generiert. Der Wert von $4,99 \mu\text{Sv/h}$ rührt überwiegend von den Hauptkühlmittelleitungen in diesem Raumbereich (Rohr F1, Volumenausgleichsleitung) und dem Unterteil der Pumpe selbst her. Die durch Betonwände gut abgeschirmten Quellen der benachbarten Raumbereiche spielen radiologisch keine Rolle, auch nicht der benachbarte Druckhalter, selbst wenn dieser nicht dekontaminiert wurde. In weiteren Simulationen für neuere Anlagengenerationen (mit noch geringeren Aktivitäten) werden diese irrelevanten Quellen nicht mehr simuliert.

Es ergibt sich eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von $467 \mu\text{Sv}$. Die Tätigkeitsdosisleistung beträgt rund $2,5 \mu\text{Sv/h}$. Bei 40 beteiligten Personen und 7500 Personenstunden beträgt die simulierte Kollektivdosis für den HKMP-Abbau im generischen DWR $18,7 \text{ mSv}$. Innerhalb der Unsicherheiten beträgt die geringste zu erwartende Kollektivdosis $9,4 \text{ mSv}$. Maximal können 28 mSv auftreten. Die kleinste zu erwartende mittlere individuelle Personendosis beträgt $234 \mu\text{Sv}$, das Maximum liegt bei $701 \mu\text{Sv}$.

5.3.2 HKMP-Abbau in Anlagen der dritten KWU/Siemens-Generation

Die Simulationen werden analog zu denen für die zweite Siemens/KWU-Generation durchgeführt, wobei die Nuklidvektoren, die Materialauswahl der Komponenten und die Stärke der Wände an die Gegebenheiten in Anlagen der dritten Generation angepasst werden.

Erwartungsgemäß ist die Ortsdosisleistung am Pumpenmotor (oberer Punkt) und in mittlerer Höhe (oberhalb der 10-m-Ebene) - wie schon im vorigen Beispiel - vernachlässigbar.

Demgegenüber liefert die Simulation für den unteren Punkt Beiträge zur Strahlenexposition des dort arbeitenden Personals. Zur Ortsdosisleistung von $1,82 \mu\text{Sv/h}$ tragen die in diesem Raumbereich befindlichen Komponenten und Systeme bei, insbesondere das Unterteil der Hauptkühlmittelpumpe (ca. 19 %), die Volumenausgleichsleitung (ca. 28 %) und die dort befindliche Hauptkühlmittelleitung (insgesamt ca. 52 %). Aus entfernten Raumbereichen, d. h. hinter abschirmenden Wänden, resultiert ein vernachlässigbarer Beitrag.

Es ergibt sich für die Tätigkeit insgesamt eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von 171 μSv . Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund 0,9 $\mu\text{Sv/h}$. Die simulierte Kollektivdosis für den HKMP-Abbau in einer 4-Loop-Anlage der dritten KWU/Siemens-Generation beträgt 6,8 mSv. Individual- und Kollektivdosen sind demnach bei Anlagen der dritten Generation für diese Tätigkeit gegenüber der zweiten Anlagengeneration um 2/3 verringert.

Um die Unsicherheit der Simulation zu ermitteln, wird der Zeitanteil des Aufenthaltes am unteren ODL-Messpunkt minimiert (25 %) bzw. maximiert (75 %). Daraus resultiert eine minimale individuelle mittlere Personendosis von 86 μSv und eine minimale Kollektivdosis von 3,4 mSv. Die maximal zu erwartenden Werte liegen bei 256,5 μSv für die individuelle mittlere Personendosis und 10,3 mSv für die Kollektivdosis. Die Spannweiten in den ermittelten Werten decken den Bereich der Unsicherheit in der Simulation unter den genannten Voraussetzungen ab.

Eine grundsätzliche Unsicherheit besteht jedoch genau bei diesen Voraussetzungen. Insbesondere muss der Personal- und Zeitaufwand als unsicher gelten, da hierfür nur unvollständige Daten zu einer Anlage vorlagen und nicht klar ist, ob diese Daten für andere Anlagen repräsentativ sind. Dies gilt umso mehr für Anlagen neueren Typs, da die Referenz eine Anlage der ersten Generation ist.

5.3.3 HKMP-Abbau in Anlagen der vierten KWU/Siemens-Generation

Auf Grund der gewonnenen Erkenntnis aus der Simulation der DE-Abbautätigkeit, dass eine Systemdekontamination in Konvoi-Anlagen radiologisch sinnvoll und daher ratsam erscheint, wird die Simulation des HKMP-Abbaus mit den entsprechenden Nuklidvektoren durchgeführt.

Die Simulationen werden ansonsten analog zu denen für die zweite und dritte Siemens/KWU-Generation durchgeführt, wobei neben den Nuklidvektoren die Materialauswahl der Komponenten und die Stärke der Wände an die Gegebenheiten in Anlagen der vierten Generation angepasst werden.

Erwartungsgemäß ist die Ortsdosisleistung am Pumpenmotor (oberer Punkt) und in mittlerer Höhe (oberhalb der 10-m-Ebene) vernachlässigbar.

Demgegenüber liefert die Simulation für den unteren Punkt Beiträge zur Strahlenexposition des dort arbeitenden Personals. Zur Ortsdosisleistung von $0,14 \mu\text{Sv/h}$ tragen die in diesem Raumbereich befindlichen Komponenten und Systeme bei, insbesondere die Volumenausgleichsleitung (ca. 34 %) und die dort befindliche Hauptkühlmittelleitung (insgesamt ca. 62 %). Aus entfernten Raumbereichen, d. h. hinter abschirmenden Wänden, werden keine relevanten Beiträge zur Strahlenexposition generiert.

Es ergibt sich für die Tätigkeit insgesamt eine mittlere Gesamtdosis je Arbeiter von $13 \mu\text{Sv}$. Die Tätigkeits-Dosisleistung beträgt rund $0,07 \mu\text{Sv/h}$. Bei 40 beteiligten Personen und 7500 Personenstunden beträgt die simulierte Kollektivdosis für den HKMP-Abbau in einer 4-Loop-Anlage der vierten KWU/Siemens-Generation $525 \mu\text{Sv}$. Individual- und Kollektivdosen sind demnach bei Anlagen der vierten Generation für diese Tätigkeit gegenüber der dritten Anlagengeneration noch einmal um eine Größenordnung verringert.

Um die Unsicherheit der Simulation zu ermitteln, wird der Zeitanteil des Aufenthaltes am unteren ODL-Messpunkt wieder minimiert (25 %) bzw. maximiert (75 %). Daraus resultieren eine minimale individuelle mittlere Personendosis von $7 \mu\text{Sv}$ und eine minimale Kollektivdosis von $263 \mu\text{Sv}$. Die maximal zu erwartenden Werte liegen bei $19 \mu\text{Sv}$ für die individuelle mittlere Personendosis und $776 \mu\text{Sv}$ für die Kollektivdosis. Die Spannweiten in den ermittelten Werten decken den Bereich der Unsicherheit in der Simulation unter den genannten Voraussetzungen ab. Die Unsicherheit in den Voraussetzungen kann nicht numerisch angegeben werden.

Im Gesamtvergleich der KWU/Siemens-Anlagengenerationen sinkt – den Ergebnissen der Simulationen zufolge – die Kollektivdosis beim Abbau von Hauptkühlmittelpumpen von Generation zu Generation erheblich, insbesondere bedingt durch die jeweils veränderten Nuklidvektoren. In Abb. 5.7 sind die prognostizierten Unterschiede veranschaulicht.

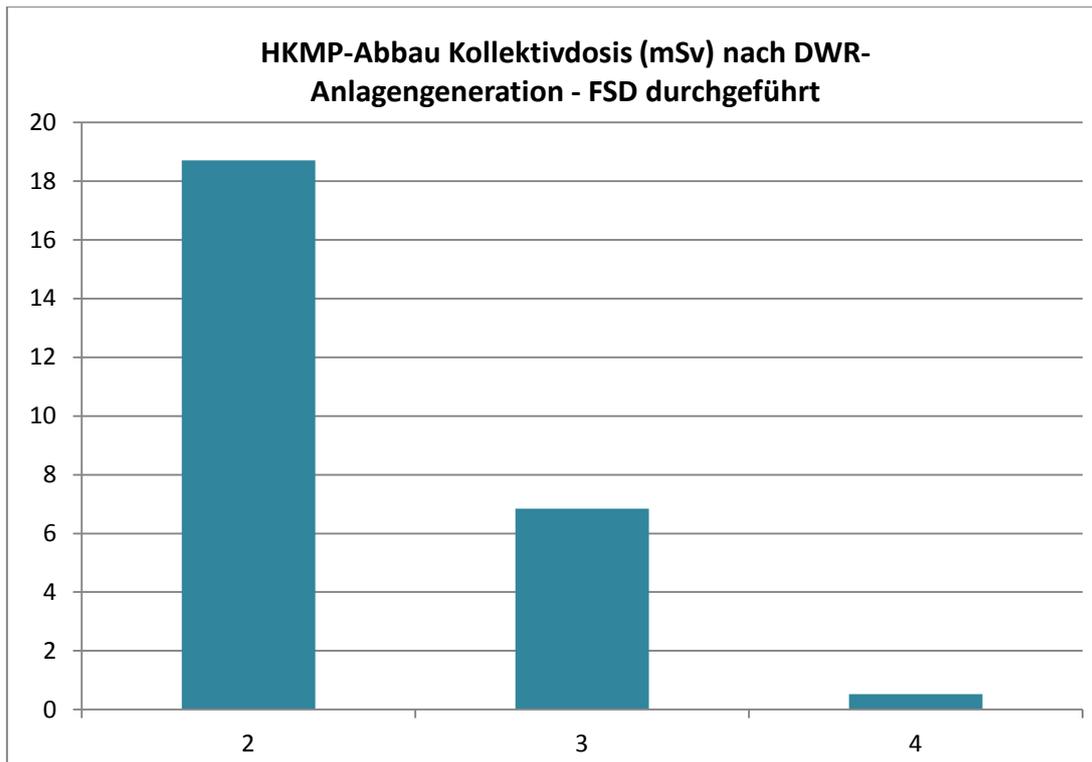


Abb. 5.7 Simulierte Kollektivdosis beim Abbau einer Hauptkühlmittelpumpe für verschiedene DWR-Generationen

5.3.4 Diskussion der Simulationsergebnisse zum HKMP-Abbau

Der Abbau von Hauptkühlmittelpumpen im Rahmen der Stilllegung und nach erfolgter Systemdekontamination wurde in Deutschland bislang zweimal in KWU/Siemens-Anlagen mit Druckwasserreaktoren praktiziert. Die beiden Anlagen der ersten Generation entsprechen denjenigen, welche auch in der Diskussion der Ergebnisse zum DE-Abbau aufgeführt wurden (s. Kapitel 5.1.4). Zum Arbeitsaufwand in Personenstunden liegen nur unvollständige Daten zu Beispielanlage 1 vor. Diese wurden auch als Referenz zur Erstellung des generischen Tätigkeitsmodells herangezogen. Da keine weiteren Daten vorliegen, erübrigen sich vergleichende Diskussionen hierüber. Für Beispielanlage 1 liegen die Daten zur Kollektivdosis in Folge des HKMP-Abbaus vollständig vor. Unter Annahme eines konstanten Personaleinsatzes bei konstanter mittlerer Job-ODL lassen sich die fehlenden Parameter extrapolieren bzw. berechnen, so dass sich folgende Datenlage ergibt:

- Anzahl HKMPn: 4
- Arbeitsaufwand¹: 7240 Pers. h
- Personaleinsatz¹: 37 Pers.
- Kollektivdosis: 40,19 mSv
- mittlere Job-ODL¹: 5,55 μ Sv/h
- mittlere Personendosis²: 1,086 mSv.

Diese Daten sind am ehesten vergleichbar mit denen für den HKMP-Abbau in der generischen Generation-2-Anlage. Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, liefert das Modell eine Tätigkeits-Dosisleistung von 2,5 μ Sv/h. Die mittlere Personendosis liegt bei etwa 0,5 mSv (0,23 bis 0,7 mSv). Der durch Simulation ermittelte Wertebereich liegt damit noch unterhalb des (extrapolierten) Messwertes, wobei dessen eigene Unsicherheit nicht angegeben werden kann. Eine Übereinstimmung innerhalb eines Faktors zwei ist gegeben und angesichts der eingeschränkten Vergleichbarkeit einer Einzelanlage (und nicht etwa Mittelwerten) mit einem generischen Modell ist dies ein guter Wert. Das gleiche gilt für die Kollektivdosis, für die das Modell 18,7 mSv (9,4 bis 28 mSv) liefert.

Für den HKMP-Abbau in Beispielanlage 2 liegt als Messwert lediglich die Kollektivdosis zu einem Teilumfang der Abbautätigkeit vor. Die gesamte Kollektivdosis kann durch Plausibilitätsbetrachtungen lediglich zu < 7,3 mSv für zwei HKMPn abgeschätzt werden. Extrapoliert für vier HKMPn (< 14,6 mSv) ergibt sich ein Wert, der gut mit dem Ergebnis der Simulation übereinstimmt.

¹ Extrapoliert oder als konstant angenommen (Personaleinsatz).

² Berechnet aus extrapolierten Daten.

Die Simulation des HKMP-Abbaus in neueren Anlagengenerationen liefert erwartungsgemäß niedrigere Ortsdosisleistungen und Personendosen. Da bislang noch kein Abbau von Hauptkühlmittelpumpen in Anlagen der dritten und vierten KWU/Siemens-Generation erfolgt ist, können hierzu keine Vergleiche gezogen werden. Grundsätzlich ist fraglich, ob nach entsprechenden Abbaumaßnahmen über die tätigkeitsbezogenen Expositionsdaten überhaupt oder in verwertbarem Detailgrad berichtet wird, da Angaben hierzu freiwillig gemacht werden. Eine erweiterte Berichterstattung, etwa im Rahmen des ISOE-Systems wäre aus Sicht der Autoren wünschenswert. Nichtsdestotrotz können die Ergebnisse einen Anhaltspunkt bieten um künftig zu erwartende Personendosen abzuschätzen.

6 Zusammenfassung

Bereits im Vorläufervorhaben wurde eine Simulationskette entwickelt, die tätigkeitsbezogene Personendosen und Jobdosisleistungen berechnen kann /GRS 16/. Das Ergebnis war ein Modell eines Druckwasserreaktors mit vier Kreisläufen im Leistungsbereich von 1200 MW vom KWU/Siemens-Typ, welches es erlaubt, Vorhersagen zur Strahlenexposition bei Tätigkeiten in Anlagen der zweiten und dritten Anlagengeneration mit hinreichender Genauigkeit zu treffen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Modell fortentwickelt und als Prognosewerkzeug angewendet werden. Dazu wurden Informationen und Messdaten durch Literaturrecherche und einen Anlagenbesuch in einer Konvoi-Anlage gewonnen.

In der Gesamtheit wurden für Druckwasserreaktoren der KWU/Siemens-Generationen 2, 3 und nunmehr 4, typische Revisionstätigkeiten an den Hauptkühlmittelpumpen, am Druckhalter und an den Dampferzeugern simuliert und die Ergebnisse mit Messwerten verglichen. Simulation und Messung stimmen im Rahmen der Streuung von Messwerten und der Unsicherheit in der Simulation gut überein. Für die in dieser Arbeit hinzugekommenen Konvoi-Anlagen (Generation 4) ist die Übereinstimmung noch etwas größer als für die älteren Anlagentypen. Dies ist zu erwarten gewesen, da die drei existierenden Konvoi-Anlagen KKE, KKI-2 und GKN-II baulich und annähernd zeitlich gleich errichtet wurden und somit einerseits weniger Streuung in den Daten vorliegt und andererseits auch das Modell sich auf eine Referenz beziehen kann. Die gute Übereinstimmung von simulierten Werten und Messdaten bei den im ISOE-System und z. B. in „RSK-Berichten“ gut dokumentierten Revisionstätigkeiten zeigte, dass sich die Simulationskette eignet, um auch weiter gehende Simulationen durchzuführen.

Stand 2017 befinden sich alle deutschen Anlagen der Generation 2 im Abbau oder stehen kurz davor. Die Anlagen der Generationen 3 und 4 sollen spätestens Ende 2021 bzw. 2022 endgültig abgeschaltet /AtG 17/ und danach möglichst direkt abgebaut werden (z. B. /ENB 16/). In naher Zukunft werden Abbautätigkeiten somit die relevanten Tätigkeiten des Personals in allen deutschen KKW sein. Weitgehend abgebaut sind bereits mehrere deutsche Anlagen der ersten DWR-Generation. Hiervon ausgehend wurden Tätigkeitsmodelle für den Abbau von Dampferzeugern und Hauptkühlmittelpumpen erstellt und auf die Modellanlagen der späteren Generationen angewendet. Das Ergebnis bietet eine Prognose über die dabei möglicherweise zu erwartenden Personendosen. Von Generation zu Generation nimmt diese demnach drastisch ab, wenn davon ausgegangen werden kann, dass in allen Fällen Primärkreisdekontamina-

tionen vor dem Abbau durchgeführt werden. Die Zukunft wird zeigen, wie realistisch diese Prognose ist; Erfahrungen und Messwerte liegen für die neueren Anlagengenerationen noch nicht vor.

Die Auswirkung einer Primärkreisdekontamination auf die Tätigkeitsdosis in der Stilllegung wurde für die Tätigkeit des Dampferzeuger-Abbaus vergleichend simuliert. Die Dosisersparung ist erheblich und wurde von den Autoren dieses Berichts in dem Ausmaß nicht erwartet. Folglich ist damit die einleitend gestellte Frage beantwortet, ob in Konvoi-Anlagen eine Systemdekontamination vor der Stilllegung überhaupt sinnvoll ist. Eine Beschränkung auf Teilsysteme könnte vom radiologischen Nutzen aber gegebenenfalls genügen, da auch die Simulation nur Aussagen über Teilsysteme erlaubt. Für Systemdekontaminationen existiert in Deutschland mit ASDOC_D-MOD eine weitere validierte FSD-Methode, die neben den HP-CORD-Verfahren ihre Effektivität bewiesen hat.

Literaturverzeichnis

- /AtG 17/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren; <https://www.gesetze-im-internet.de/atg/> Stand 05.09.2017
- /BON 16/ J. Bonnefon; Radiation Protection Success of SGR; Blayais Unit 3; EDF DIPDE; ISOE Symposium, Juni 2016; Brüssel, Belgien
- /CUR 14/ I. Curieres; The Evolution Of Chemistry In PWR Nuclear Power Plants: Overview And Safety Perspectives; IRSN, Frankreich; NPC 2014, Sapporo, Japan
- /ENB 16/ EnBW Kernkraft GmbH; Kernkraftwerk Neckarwestheim II – Antrag auf Erteilung einer Stilllegungs- und Abbaugenehmigung (SAG) für das Kernkraftwerk Neckarwestheim Block II gemäß § 7 Abs. 3 Atomgesetz (AtG); 18.07.2016
- /GRO 09a/ Grove Software Inc., Microshield Validation Report, Handbuch, 2009
- /GRO 09b/ RadDecay, Radioactive Nuclide Library and Decay Software, Grove Software Inc., Version 4.0, Software Description and User's Manual, July 2009
- /GRO 11/ Grove Software Inc., MicroShield User's Manual, 2011
- /GRO 15/ Microshield, Grove Software Inc.,
<http://radiationsoftware.com/microshield/> (letzter Aufruf: 04.08.2017)
- /GRS 16/ A. Artmann, G.Bruhn, S. Schneider, E. Strub; Generische Studie zum Zusammenhang zwischen Kontamination von Primärkreislaufmedien und beruflicher Strahlenexposition bei Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor; GRS 406, ISBN 978-3-9-44161-88-4; Januar 2016
- /ISO 17/ Information System On Occupational Exposure; Internetseite:
<http://www.isoe-network.net>; abgerufen am 12.12.2017

- /KEM 17/ H. Kemmeter, R. Juch; RSK-Präsentation: KW Biblis, Primärkreisdekontamination [FSD] Block A, A017/12 NT 1; Block B, B015/12; RWE LA KWB, RWE GCK-BA-P; 19.05.2017
- /MAR 14/ J. G. Marques; Environmental characteristics of the current Generation III nuclear power plants; WIREs Energy Environ 2014, 3: 195–212. doi: 10.1002/wene.81; John Wiley & Sons, Ltd.
- /NEE 97/ Neeb, K. H.; The Radiochemistry of Nuclear Power Plants with Light Water Reactors; Walter de Gruyter, Berlin / New York, 1997
- /PUJ 16/ A. P. Pujals et al.; ALARA Program and RP Activities for the Reactor Vessel Head Replacement at CN Vandellòs II; Vandellòs NPP, Spanien; ISOE International Symposium 2016, 02. Juni 2016
- /SCH 16/ M. Schienbein, T. Bursian; ALARA-Planung im Rahmen internationaler Großprojekte; Dampferzeugertausch in einer ausländischen DWR-Anlage; Areva GmbH; TÜV SÜD – München, 17. Juni 2016
- /STE 12/ B. Stellwag, S. Schütz, A. Jacob, St. Hoffmann-Wankerl; FSD for operating NPPs as part of sustainable dose reduction - Recontamination evaluation for the German PWR Grafenrheinfeld; Areva NP GmbH / E.ON Kernkraft GmbH; NPC 2012, Paris, September 2012
- /VER 16/ M. Verbruggen; Reactor Vessel Head Replacement at Doel 4 – Practical Application of Dose Reduction and ALARA Techniques; Doel NPP, Belgien; ISOE International Symposium 2016, 02. Juni 2016

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	ODL-Entwicklung und Veränderungen der Kühlmittelchemie in einem deutschen KKW der 3. Generation /STE 12/.....	10
Abb. 3.2	Darstellung von Abschirmmaßnahmen vor dem Austausch eines Dampferzeugers in einer Framatom-Anlage /SCH 16/.....	15
Abb. 3.3	ODL-Prognosen heiße Seite mit und ohne Abschirmungen zu verschiedenen Phasen des DE-Tausches in einer Framatom-Anlage /SCH 16/.....	16
Abb. 3.4	Probenstrecke zur Auslagerung von Materialproben /KEM 17/.....	17
Abb. 4.1	Repräsentative Aufenthaltsorte für die Abbautätigkeit "Dampferzeugerausbau". Die Spitzen der violetten Pyramiden repräsentieren die Vorarbeiten, die roten die Hauptarbeiten.....	32
Abb. 4.2	ODL-Messpunkte für die Stilllegungstätigkeit des HKMP-Abbaus.....	35
Abb. 5.1	Auswahl der Raumpunkte am Gewerk "Hauptkühlmittelpumpe" (rote Pyramiden), deren Ortsdosisleistung berechnet wird.....	39
Abb. 5.2	Vergleich der errechneten Kollektivdosen für Tätigkeiten an den HKMP für verschiedenen DWR-Generationen.....	40
Abb. 5.3	Simulierte ODL-Messpunkte für die Tätigkeiten am Druckhalter.....	41
Abb. 5.4	Vergleich der errechneten Kollektivdosen für Tätigkeiten am Druckhalter für verschiedenen DWR-Generationen.....	42
Abb. 5.5	Vergleich der errechneten Kollektivdosen für die Tätigkeit „Wirbelstromprüfung am Dampferzeuger“ für verschiedenen DWR-Generationen.....	44
Abb. 5.6	Simulierte Kollektivdosis beim Abbau eines Dampferzeugers für verschiedene DWR-Generationen.....	53
Abb. 5.7	Simulierte Kollektivdosis beim Abbau einer Hauptkühlmittelpumpe für verschiedene DWR-Generationen.....	60

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Ortsdosisleistungen an ausgewählten Punkten am Primärkreislauf einer Konvoi-Anlage. Sämtliche ODLen sind im Kontakt gemessen worden (an der Isolierung oder darunter).....	21
Tab. 4.1	Normierter Nuklidvektor für Konvoi-Anlagen	23
Tab. 4.2	Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Revision)	24
Tab. 4.3	Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Stilllegung, ohne FSD).....	24
Tab. 4.4	Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Stilllegung, mit FSD).....	26
Tab. 4.5	Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Gen. 2, Stilllegung, mit FSD)	27
Tab. 4.6	Relevante Komponenten, innere Oberflächen und Aktivitäten (Gen. 3, Stilllegung, mit FSD)	28
Tab. 4.7	Aufteilung der Tätigkeit "DE-Abbau in Teiltätigkeiten"	30
Tab. 5.1	Einordnung der Simulationsergebnisse im Vergleich zu tatsächlichen Messwerten für Konvoi-Anlagen	46

Abkürzungsverzeichnis

AtG	Atomgesetz
ASDOC_D	Advanced System Decontamination by Oxidizing Chemistry
CORD	Chemische Oxidation Reduktion Dekontamination
DE	Dampferzeuger
DF	Dekontfaktor
DfD	Decontamination for Decommissioning
DWR	Druckwasserreaktor
FSD	Full System Decontamination
GKN-II	Kernkraftwerk Nekar, Block 2
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
HP	Permangansäure
ISOE	Information System On Occupational Exposure
KKE	Kernkraftwerk Emsland
KKI-2	Kernkraftwerk Isar, Block 2
KKW	Kernkraftwerk
KWB-A/B	Kernkraftwerk Biblis, Block A/B
KWU	Kraftwerk Union
MSA	Methylsulfonsäure
NIS	Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH
ODL	Ortsdosisleistung
RDB	Reaktordruckbehälter
RSK	Reaktorsicherheitskommission
RWE	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
CAD	Computer-Aided Design

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1

50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-946607-67-0