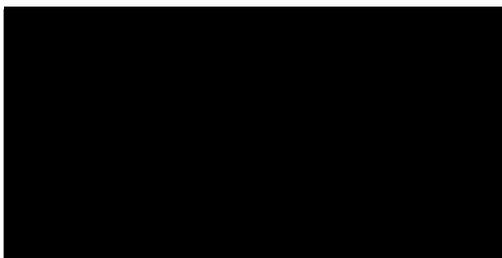




KKB 01 000 347 90



# TECHNISCHER BERICHT

**Aktivierungsberechnung für Reaktordruckbehälter, Einbauten und  
Biologischen Schild des KKW Brunsbüttel**

Doku.-Kennz.: DSR/06/14

Revision: -



<b>DSR</b>	<b>Technischer Bericht</b>			
Doku.-Kennz.: DSR/06/14	Datum: 07.10.2014	Revision: -/-	Ref.-Nr.: 7862	
<b>Titel: Aktivierungsberechnung für Reaktordruckbehälter, Einbauten und Biologischen Schild des KKW Brunsbüttel</b>				
<p><b>Kurzfassung:</b></p> <p>Im vorliegenden Bericht wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der neutroneninduzierten spezifischen Aktivitäten für den Reaktor des KKW Brunsbüttel beschrieben. Betrachtet wurden der RDB, die RDB-Einbauten und der Biologische Schild. Der SHB wird nicht berechnet, da die Beiträge der spezifischen Aktivitäten gering sind. Die Ergebnisse wurden in einem Excel-Makro zusammengefasst, mit dem in dreidimensionaler Geometrie die spezifischen Aktivitäten für verschiedene Raumbereiche ausgegeben werden können.</p> <p>Eine Prüfung der Rechnungen auf Plausibilität erfolgte durch Vergleich mit in der Vergangenheit durchgeführten Fluenzberechnungen sowie durch einen Vergleich verschiedener Rechenprogramme. Ferner wurden Ergebnisse der Aktivierungsberechnung mit Analysenergebnissen von bestrahlten Materialproben verglichen. Die Rechnung und die Messung stimmen gut überein.</p> <p>Die Auswahl der im Bericht dargestellten Nuklide beschränkt sich dabei auf Co60, Fe55, Mn54, Ni59, Ni63 und Nb94 für Stahlkomponenten und zusätzlich H3, Eu152 und Eu154 für Beton. Diese Nuklide spiegeln bereits zwei Jahre nach Abschalt datum fast das gesamte Aktivitätsinventar wieder. Die Gesamtaktivität dieser Nuklide beläuft sich für den RDB, die RDB-Einbauten und den Biologischen Schild auf 1,2E+16 Bq zum Bezugsdatum 30.06.2015.</p>				
		Datum	Name	Unterschrift
erstellt:	DSR Ingenieurgesellschaft mbH	07.10.2014		
geprüft:	DSR Ingenieurgesellschaft mbH	07.10.2014		
freigegeben:	DSR Ingenieurgesellschaft mbH	07.10.2014		
Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhaltes sind nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung vorbehalten.				

## Inhaltsverzeichnis

	Seite	
<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>EINGANGSDATEN</b>	<b>4</b>
2.1	Leistungsgeschichte	4
2.1.1	Auswirkungen der Modellierung der Leistungsgeschichte	5
2.2	Geometrie	6
2.3	Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern	8
2.4	Wasserdichten	8
2.5	Chemische Materialzusammensetzung	10
<b>3</b>	<b>BERECHNUNG DER NEUTRONENFLUSSDICHTEN</b>	<b>11</b>
3.1	Überprüfung der berechneten Neutronenflussdichten	11
3.1.1	Fluenzvergleich	11
3.2	Vergleich verschiedener Programme	14
3.2.1	Radialer Flussdichteverlauf in der Kernmittelebene	14
3.2.2	Axialer Flussdichteverlauf auf der Symmetrieachse	15
<b>4</b>	<b>BERECHNUNG DER SPEZIFISCHEN AKTIVITÄT</b>	<b>17</b>
4.1	Nuklidauswahl	17
4.2	Abgleich mit Messdaten	18
4.3	Ausgewählte Aktivierungsergebnisse	20
4.4	Gesamtaktivität	24
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>30</b>
	<b>ANHANG</b>	<b>31</b>
	Bedienung des Makros	41
	Hinweise zur Performance des Makros	42

## 1 Einleitung

Der Leistungsbetrieb des Kernkraftwerks Brunsbüttel (KKB) wurde im Jahr 2007 eingestellt. Im Zuge der radiologischen Charakterisierung der Anlage in Vorbereitung von Stilllegung und Rückbau ist unter anderem die Berechnung der neutroneninduzierten Aktivierung des Reaktordruckbehälters (RDB) und dessen Einbauten sowie des Biologischen Schildds notwendig.

Im vorliegenden Bericht werden die Vorgehensweise zur Ermittlung der spezifischen Aktivitäten beschrieben und die Ergebnisse der Berechnungen in dreidimensionaler Geometrie angegeben. Die Ausgabe und Auswertung der Ergebnisse erfolgt über ein Excel-VBA-Makro. Auf Basis dieser Daten können die Aktivitätsinventare aller relevanten Komponenten bestimmt werden.

Die Berechnung der spezifischen Aktivitäten erfolgte dabei in zwei Schritten. Zunächst wurde die Neutronenflussdichteverteilung innerhalb des Sicherheitsbehälters des KKB bestimmt. Hierfür wurden die Programme SAS1 /5/, DORT /6/ und Attila /1/ eingesetzt, welche die Boltzmann-Transportgleichung nach der Sn-Methode ein-, zwei-, bzw. dreidimensional lösen. Am Ende der Berechnung liegt die räumliche Flussdichteverteilung für das gesamte Modell im Falle von Attila in 22 Energiegruppen vor. Im zweiten Schritt wurden die Flussdichten auf drei Gruppen kondensiert und für die Aktivierungsrechnungen mit dem DSR-Aktivierungsprogramm /2/ verwendet. Die hierbei verwendeten Materialdaten wurden aus komponentenweise vorliegenden Werkstoffdaten abgeleitet.

Die Validierung der berechneten spezifischen Aktivitäten sollte durch den Abgleich mit Messergebnissen erfolgen. Bisher lagen hierfür Ergebnisse aus dem Probenbehälter einer Voreilprobe aus dem Jahr 1988 sowie Proben aus einem Wasserbehälter und einem Thermosleeve vor. Hierbei waren jedoch die Materialzusammensetzungen der Proben nur teilweise bekannt bzw. konnten nur begrenzt mit dem Rechenmodell verglichen werden. Ein repräsentativer Vergleich würde Proben aus der Kernmittelebene oder anderen der Berechnung zuordenbaren Bereichen erfordern. Gegebenenfalls sind diese Vergleiche im weiteren Ablauf des gesamten Verfahrens durchzuführen.

## 2 Eingangsdaten

Zur Berechnung der spezifischen Aktivität waren als Eingangsdaten zunächst die Leistungsgeschichte (Betriebshistorie) des Reaktors, die Geometrie, die Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern, die räumliche Variation der Wasserdichten und die chemische Zusammensetzung der relevanten Komponenten notwendig /3/. Dann wurden erst die Neutronenflussdichten im gesamten Modell berechnet und diese anschließend für die Aktivierungsrechnungen herangezogen.

### 2.1 Leistungsgeschichte

Die Leistungsgeschichte des KKB wurde für die Jahre 1976 bis 1995 dahingehend vereinfacht, dass für jedes Kalenderjahr ein Leistungsmittelwert angenommen wurde. Dieser ergab sich aus der im Kalenderjahr erzeugten Energie und den Betriebstagen. Stillstände größer zwei Tage wurden als Tage mit Leistung Null berücksichtigt. Ab 1996 wurde der Leistungsmittelwert monatlich bestimmt. Ausschlaggebend für die Aktivierungsrechnungen ist, wie nachfolgend gezeigt, im Wesentlichen die genaue Modellierung der jüngsten Betriebszyklen. In Anhang B ist die zusammengefasste Leistungsgeschichte angegeben.

### 2.1.1 Auswirkungen der Modellierung der Leistungsgeschichte

Die Betriebshistorie wurde durch Leistungsmittelwerte modelliert, die sich aus der erzeugten Energie in einem Kalenderjahr oder einem Monat ergeben. Eventuelle Veränderungen in der Leistung, wie beispielsweise im Streckbetrieb, werden damit ggf. nicht genau abgebildet. Tatsächlich ist eine sehr genaue Abbildung der Betriebshistorie gar nicht notwendig, wie Abbildung 1 (durchgezogene Linien) zu entnehmen ist. Dargestellt ist die Entwicklung der spezifischen Aktivität an der Innenseite des Kernmantels in der Kernmittelebene.

Zu Beginn des Reaktorbetriebs ist die neutroneninduzierte spezifische Aktivität stark von der Betriebshistorie abhängig, so dass sich Unterschiede in deren Modellierung stark auf das Ergebnis auswirken. Im Verlauf des Reaktorbetriebs gehen die spezifischen Aktivitäten schließlich in Sättigung über, so dass die Anfangsjahre der Betriebshistorien schließlich nicht mehr zum Endergebnis beitragen.

Daher wird der oben beschriebenen Vorgehensweise bei der Modellierung der Betriebshistorie die Entwicklung der spezifischen Aktivität einer „noch einfacheren“ (gestrichelte Linien in Abbildung 1) Modellierung gegenübergestellt. Dabei wurde vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme bis zum Jahr 1995 die gleiche Leistung angenommen. Der Rest der Betriebshistorie gleicht dann derjenigen aus Abschnitt 2.1. Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, unterscheidet sich die Entwicklung der spezifischen Aktivität kaum voneinander. Am Ende des Reaktorbetriebs sind die spezifischen Aktivitäten gleich (Unterschied < 0,4 %). Ausschlaggebend ist somit bei der Betriebshistorie die genauere Modellierung der letzten Zyklen.

Eine Variation mit noch feinerer Auflösung der Betriebshistorie zum Ende hin wurde nicht durchgeführt, da sich die spezifischen Aktivitäten im Wesentlichen bereits in Sättigung befinden und die oben beschriebene monatliche Auflösung im Vergleich zu den Halbwertszeiten ausreichend ist.

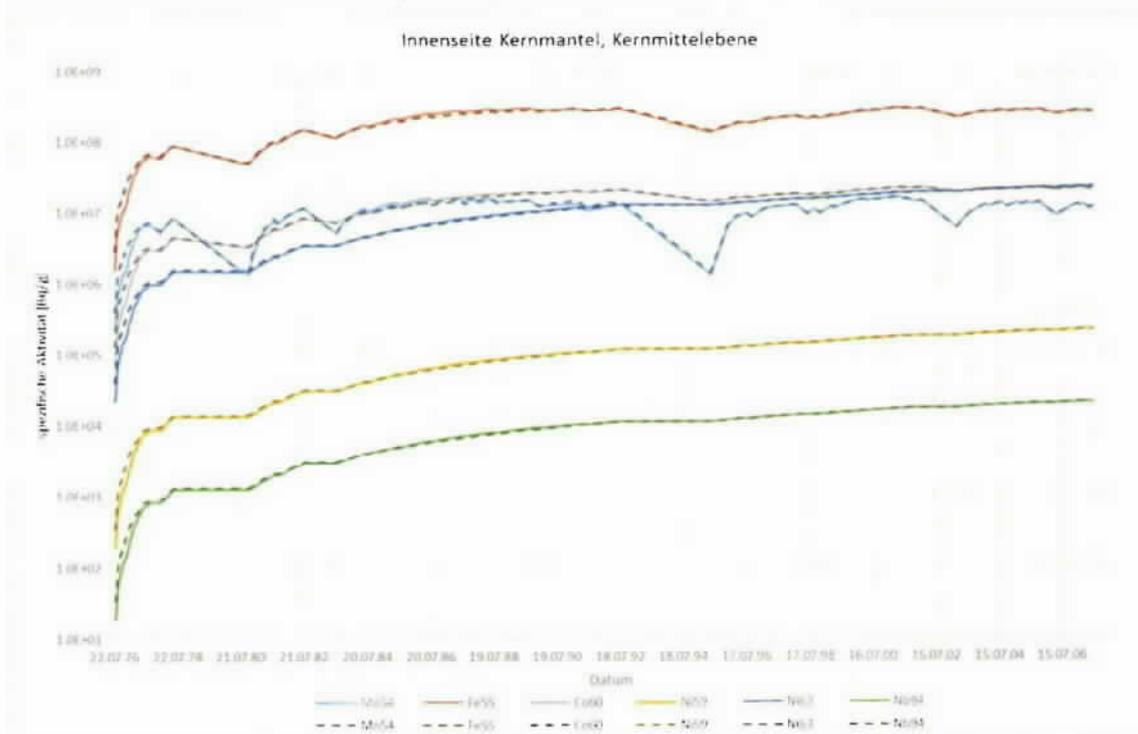


Abbildung 1: Einfluss der Betriebshistorienmodellierung der Jahre bis 1995 auf die berechnete spezifische Aktivität zum Betriebsende

## 2.2 Geometrie

Für die Berechnung der Neutronenflussdichten im KKB wurde ein dreidimensionales 45-Grad-Modell<sup>1</sup> erstellt. Es umfasst den RDB, die RDB-Einbauten, den Bioschild, den Splitterschutz sowie den Sicherheitsbehälter.

Vor dem Hintergrund, dass die Berechnungen der Zielstellung „Erstellung der Antragsunterlagen“ und „Zerlege- und Verpackungsplanung“ dienen sollen, wurden Vereinfachungen dahingehend getroffen, dass Strukturen, die die Entwicklung der Neutronenflussdichte nicht maßgeblich oder nur eng lokal beeinflussen, vernachlässigt wurden. So wurde beispielsweise die Isolierung des Reaktors im Modell vernachlässigt ebenso wie die Wasserkästen und die Zwangsumwälzpumpen. Auch wenn die vernachlässigten Strukturen im Rechenmodell nicht explizit als „Körper“ vorlagen, wurden für alle Bereiche dennoch Neutronenflussdichten erzeugt.

Ferner wurden Bereiche als homogenisierte Zonen zusammengefasst, die in Bezug auf Geometrie und Materialverhältnisse eine Einheit abbilden, da sie neutronenphysikalisch als Metall-Wasser-Gemisch dargestellt werden können. Dies reduziert den Modellierungsaufwand erheblich, ohne das Ergebnis wesentlich zu beeinflussen.

Innerhalb des RDB sind dies die Steuerstabführungsrohre, das Untere Kerngitter (UKG), das Obere Kerngitter (OKG) und der Dampftrockner (DT), wobei dieser noch in drei Schichten unterteilt wurde, um die innere Struktur trotz Homogenisierung genauer zu erfassen. Detaillierter wurden die Steuerstabantriebsgehäuserohre unterhalb des RDB modelliert, da eine Homogenisierung mit der umgebenden Luft die Verhältnisse in der Neutronenflussdichte unterschätzen würde. Analoges gilt für die Zyklonrohre, sodass diese ebenfalls einzeln modelliert wurden.

Eine Übersicht über das Modell ist in Abbildung 2 gegeben. Vollständige Modelldaten sind in /9/ gegeben.

---

<sup>1</sup> Die Anordnung der Zyklonrohre ist zwar nicht achtelsymmetrisch, was für die Entwicklung der Neutronenflussdichte abseits der „falschen“ Seite mit spiegelnder Randbedingung aber keine Rolle spielt

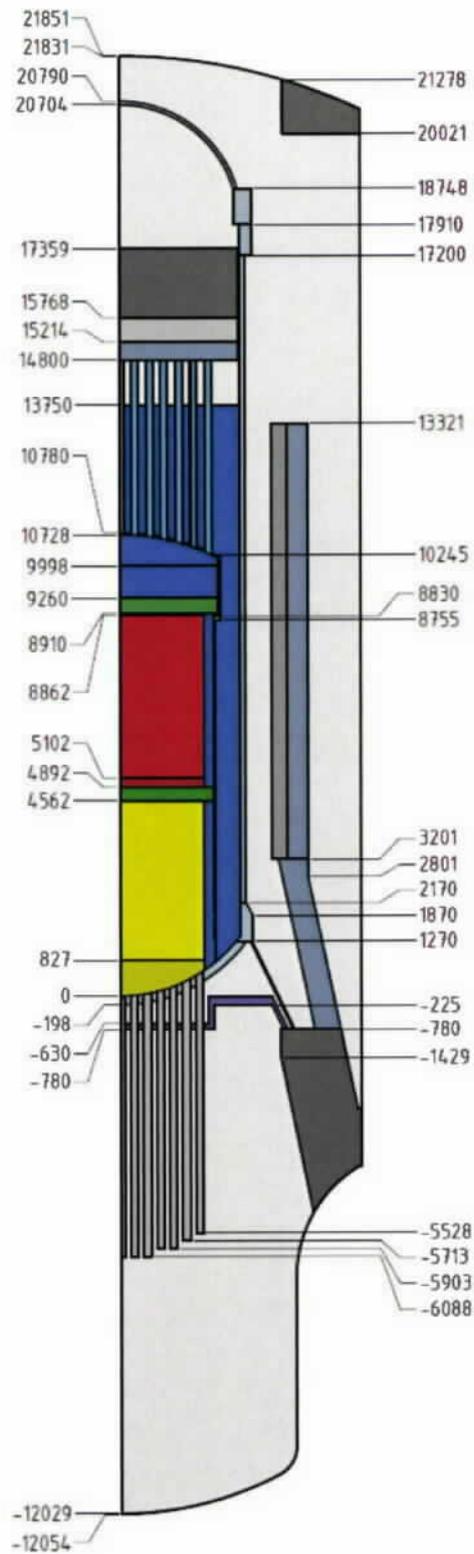


Abbildung 2: Längsschnitt durch das Rechenmodell (Höhenangaben in mm)

### 2.3 Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern

Die Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern ändert sich über einen Zyklus durch das axiale Verschieben des Leistungsdichtemaximums. Die Änderungen von einem Zyklus zum anderen sind insbesondere für die letzten fünf Zyklen der Reaktors KKB gering. Da eine Leistungserhöhung für KKB nicht durchgeführt wurde, wird über die gesamte Lebensdauer des Reaktors von einer mittleren Leistungsdichteverteilung ausgegangen.

Für die Berechnung der Neutronenflussdichten sind in Attila Neutronenquellstärken für das Quellgebiet einzugeben. Hierfür wurden die Leistungsdichteverteilungen der letzten fünf Betriebszyklen gemittelt. Die Verteilungen waren dabei in 24 axiale Schichten und sieben Ringe diskretisiert und deren Entwicklung über den jeweiligen Zyklus angegeben. Da für die Neutronenflussdichte in der Umgebung der Spaltzone die Leistungsdichteverteilungen am Rand der Spaltzone ausschlaggebend sind, wurde der Reaktorkern axial und radial so zusammengefasst, dass die Leistungsdichteverteilung in den Rändern entsprechend wiedergegeben werden kann. Anhang A zeigt die radiale Aufteilung des Kerns und in Tabelle 1 sind die zusammengefassten Neutronenquellstärken angegeben.

Tabelle 1: Quellverteilung; Angaben in Neutronen/s

Axiale Schicht \ Ring	1-5	6	7
24	1,20E18	4,95E17	1,92E17
23	3,07E18	1,26E18	4,90E17
22	3,90E18	1,60E18	6,21E17
21-4	9,46E19	3,89E19	1,51E19
3	5,37E18	2,21E18	8,56E17
2	4,69E18	1,93E18	7,48E17
1	3,21E18	1,32E18	5,11E17

### 2.4 Wasserdichten

Analog zur zeitlichen mittleren Leistungsdichteverteilung wurde auch der Verlauf der Wasserdichte im Reaktor mit einem zeitlich mittleren Zustand angenommen. Hierfür waren die mittleren Wasserdichten für verschiedene Gebiete im Reaktor gegeben /13/. Für die Spaltzone lagen wiederum Wasserdichten für 24 Schichten vor /3/, da die Wasserdichte durch den zunehmenden Dampfblasengehalt nach oben hin stark abnimmt. Analog zur räumlichen Zusammenfassung der Leistungsdichteverteilung wurde auch der Verlauf der Wasserdichte in der Spaltzone gemäß der Aufteilung in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die angenommenen Wasserdichten sind in Abbildung 3 angegeben, wobei der Verlauf der Wasserdichte im Kern mit Angabe der geringsten Wasserdichte am Kopfende des Kerns nur angedeutet ist.

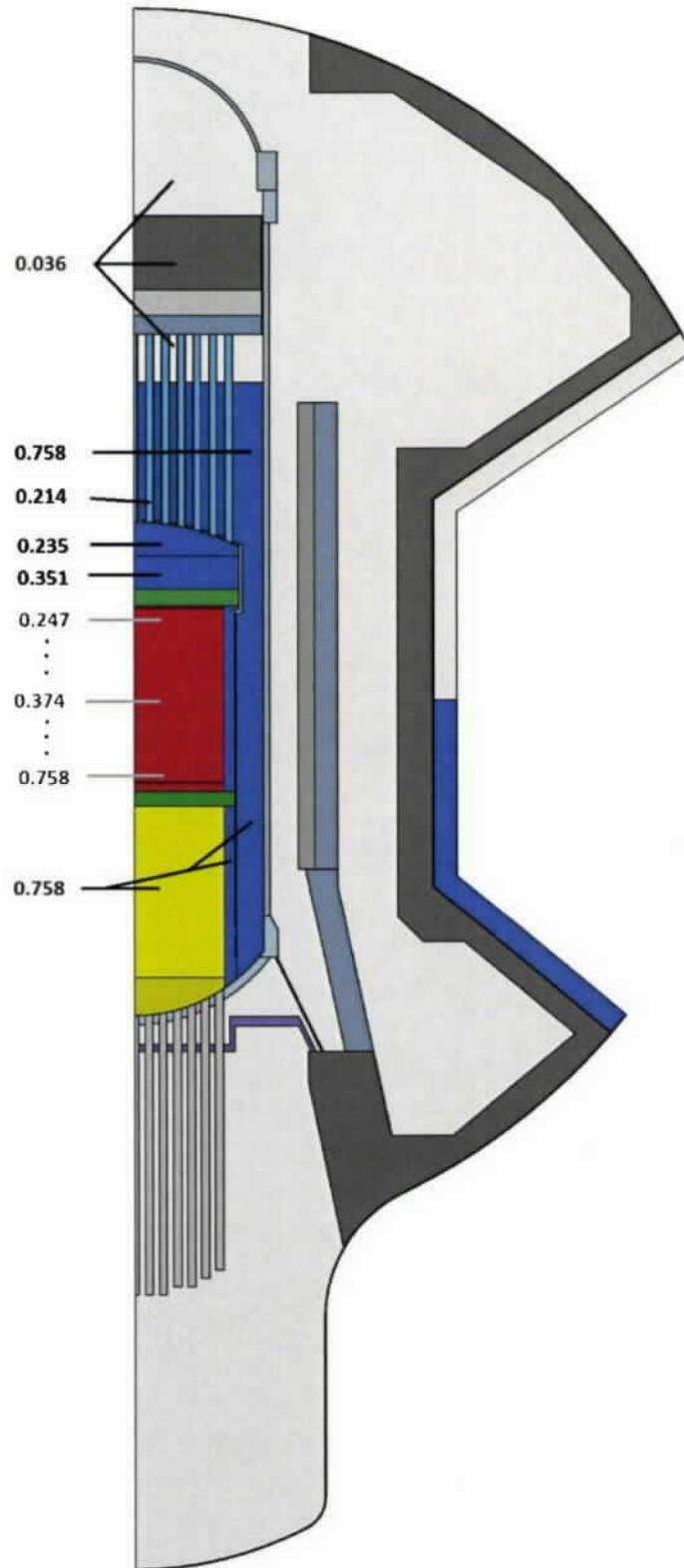


Abbildung 3: Verlauf der Wasserdichten im Modell; Angaben in g/cm<sup>3</sup>

## 2.5 Chemische Materialzusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der Materialien ist maßgebend für die Aktivierung. Daher wird die spezifische Aktivität für jede Komponente mit der zugehörigen Materialzusammensetzung angegeben, sofern entsprechende Materialdaten vorlagen. So ist z.B. die unterschiedliche Zusammensetzung jedes Schusses des Kernmantels oder des RDB bei der Bestimmung der spezifischen Aktivität berücksichtigt. Eine Übersicht über die Zusammensetzungen gibt Anhang C.

Die umfangreichen Werkstoffdaten einzelner Bestandteile der Stahlkomponenten weisen teilweise einen höheren Gehalt eines bestimmten Nuklids aus, als in Anhang C angegeben. Dies betrifft in der Regel Klein- und Ersatzteile. So sind beispielsweise Komponenten des Kerndeckels wie die „Obere Zentrierbuchse, Lfd. Nr. 1.26, Schmelzen-Nr. 41771“ mit einem Co-Gehalt von 0,064 Gew.-% angegeben. Für die Ausgabe der spezifischen Aktivitäten wurde im Excel-Makro (siehe Anhang L) aber die Zusammensetzung der Hauptkomponenten herangezogen. Im Falle des Kerndeckels wurde also der für den Deckel angegebene Co-Gehalt von 0,019 Gew.-% angesetzt, um die spezifischen Aktivitäten für die Hauptkomponente integral richtig wiederzugeben.

Komponenten, für die keine chemische Zusammensetzung angegeben war, wurde der Stahlschlüssel 1.4550 mit 200 ppm Co-Gehalt angenommen (vgl. Anhang C).

Über den Beton des Biologischen Schildes lagen nur sehr wenige Informationen vor, so dass für dessen Zusammensetzung Annahmen getroffen werden mussten. Für den Beton wurde eine Zusammensetzung gemäß DIN 25413-1 /4/ mit 4,5 Gew.-% H<sub>2</sub>O und 2 Gew.-% Fe angenommen, ergänzt um einen Co-Anteil von 200 ppm als Fe-Begleiter, 4E-5 Gew.-% Eu sowie 5E-4 Gew.-% Li /7/.

Der Biologische Schild besteht aus zwei Betonschalen, der inneren Schale und der äußeren, wobei die äußere noch eine Bewehrung enthält. Für den Bewehrungsstahl wurde Baustahl 1.0037 mit der mittleren Zusammensetzung gemäß Anhang C angenommen, da Angaben zur Zusammensetzung des in den Konstruktionszeichnungen vermerkten Stahls St 135/150, St III b nicht vorlagen.

Das Ergebnis der spezifischen Aktivität hängt für jedes Nuklid vom Gehalt des oder der Mutternuklide im Material ab. Eine Verdoppelung des Gehalts des Mutternuklids hat in der Regel auch eine Verdoppelung des Gehalts des aus diesem Mutternuklid gebildeten Tochternuklids zur Folge. Daher wirken sich Unsicherheiten in der zugrunde liegenden Materialzusammensetzung unmittelbar auf das Ergebnis der Aktivierungsberechnungen aus. Analoges gilt für Komponenten, bei denen keine Werkstoffdaten vorlagen und für die Annahmen bezüglich der Zusammensetzung getroffen werden mussten.

### 3 Berechnung der Neutronenflussdichten

Die Berechnung der Neutronenflussdichten folgte einer gestaffelten Vorgehensweise. Zunächst wurden eindimensionale Rechnungen mit dem Programm SAS1 aus dem Programmpaket SCALE 6.1 /5/ durchgeführt, gefolgt von zweidimensionalen Berechnungen mit dem Programm DORT /6/. Abschließend wurden die Neutronenflussdichten mit Attila /1/ in einem dreidimensionalen Modell berechnet.

Mit dieser Vorgehensweise kann mit SAS1 mit verhältnismäßig geringem Aufwand überprüft werden, ob alle Eingangsdaten richtig erfasst und das Modell richtig definiert wurde. Die eindimensionale SAS1-Rechnung kann für die Bestimmung der Neutronenflussdichten entlang der Reaktorhauptachsen verwendet werden und hängt vor allem radial wenig von dreidimensionalen Effekten ab.

Im nächsten Schritt wurden zweidimensionale DORT-Rechnungen durchgeführt, die in r- $\theta$ -Geometrie in der Kernmittelebene die Kernstruktur berücksichtigen können und auch eine Aussage über die azimuthale Abhängigkeit der Neutronenflussdichte erlauben. In r-z-Geometrie können schließlich erste Aussagen über die Streuung der Neutronen außerhalb des RDB und deren Rückwirkung auf das Innere des RDB durch Wiedereinstreuung getroffen werden.

Die dreidimensionale Attila-Rechnung ergänzt schließlich die vorherigen Ergebnisse mit der azimuthalen Abhängigkeit abseits der Kernmittelebene.

Insgesamt kann so in jedem Modellierungsschritt überprüft werden, ob die Rechnungen im Rahmen der Vergleichbarkeit konsistent sind. Ferner wird so bereits ersichtlich, dass auch vergleichbare Kurvenverläufe um eine Größenordnung voneinander abweichen können (vgl. Abbildung 7). Die berechneten Neutronenflussdichten bzw. die darauf aufbauenden spezifischen Aktivitäten müssen daher prinzipiell mit Messergebnissen abgeglichen werden.

In Abschnitt 4 wird beschrieben, wie die ermittelten Neutronenflussdichten für die Berechnung der spezifischen Aktivitäten weiterverwendet werden.

#### 3.1 Überprüfung der berechneten Neutronenflussdichten

Die berechneten Neutronenflussdichten wurden auf zwei Arten auf Plausibilität überprüft. Einerseits erfolgt ein Vergleich mit in der Vergangenheit durchgeführten Fluenzberechnungen für schnelle Neutronen mit Energien größer 1 MeV /8/. Diese können im Folgenden als von unabhängigen Dritten berechnete Referenz angesehen werden. Da diese Berechnungen ebenfalls mit DORT durchgeführt wurden, werden diese Ergebnisse zur besseren Unterscheidung im Folgenden immer explizit mit der Referenz /8/ gekennzeichnet.

Weiterhin werden die berechneten Neutronenflussdichten unterschiedlicher Rechenprogramme miteinander verglichen.

##### 3.1.1 Fluenzvergleich

Bei der Berechnung der Fluenz werden im vorliegenden Fall alle Neutronen mit Energien über 1 MeV über alle Zyklen aufsummiert. In den Wirkungsquerschnittsbibliotheken liegt die Grenze zwischen den Energiegruppen im Allgemeinen nicht genau bei 1 MeV. Daher wurde jeweils die nächstniedrigere Grenze für die Ausweisung der Fluenz gewählt. In SAS1 wurde die Bibliothek 27N-19G ENDF/B-VII.0 mit 27 Neutronenenergiegruppen und in Attila die Bibliothek radion15 mit 22 Energiegruppen verwendet. Die DORT-Rechnungen wurden mit BUGLE96t mit 47 Neutronenenergiegruppen durchgeführt.

In Abbildung 4 ist der radiale Verlauf der Fluenz in der Kernmittelebene jeweils für das Ende von Zyklus 13 (c13) und Zyklus 20 (c20) gezeigt. Der Verlauf der Fluenzen unterscheidet sich leicht, da, neben den unterschiedlichen Energiegruppengrenzen die Rechnungen ein-, zwei- bzw. dreidimensional durchgeführt wurden und die zugrunde liegenden Bibliotheken leicht unterschiedliche Wirkungsquerschnitte enthalten. Ein Unterschied zu den in /8/ durchgeführten DORT-Rechnungen kann auch noch aus methodischen Unterschieden in der Modellierung der Quelle und der Materialien herrühren. Ferner werden wegen der Vergleichbarkeit im Folgenden die Begriffe „Kernmittelebene“ und „axiales Fluenzmaximum“ synonym verwendet, obwohl das axiale Maximum etwas über der Kernmittelebene liegt und ca. 10% höhere Werte aufweist.

In Tabelle 2 werden die Fluenzergebnisse aus SAS1, DORT und Attila mit den aus /8/ entnommenen Werten (vgl. Anhang D) verglichen. Erkennbar ist, dass insbesondere die Ergebnisse aus Attila mit denen aus /8/ gut übereinstimmen, während SAS1 tendenziell höhere Werte liefert. Die DORT-Ergebnisse aus /8/ sind zur Veranschaulichung auch in Abbildung 4 als Punkte an den in Tabelle 2 angegebenen Positionen eingetragen.

Tabelle 2: Vergleich der berechneten Fluenzen schneller Neutronen nach dem 13. und 20. Zyklus;

Angaben in Neutronen/cm<sup>2</sup>

	SAS1		DORT		Attila		DORT /8/	
	Zykl. 13	Zykl. 20						
Kern, außen (198,45 cm)	6,0E21	9,1E21	5,5E21	8,0E21	6,7E21	1,0E22	5,0E21	7,0E21
KM, innen (217,5 cm)	3,4E20	5,0E20	3,7E20	5,5E20	3,2E20	4,9E20	3,0E20	4,2E20
KM außen (221,5 cm)	2,3E20	3,4E20	2,0E20	2,9E20	1,5E20	2,2E20	1,4E20	2,0E20
RDB, innen (279,85 cm)	6,2E17	9,3E17	3,3E17	5,0E17	2,9E17	4,3E17	3,0E17	4,2E17
RDB, außen (294,2 cm)	1,8E17	2,8E17	6,1E16	9,0E16	5,7E16	8,1E16	5,3E16	7,3E16

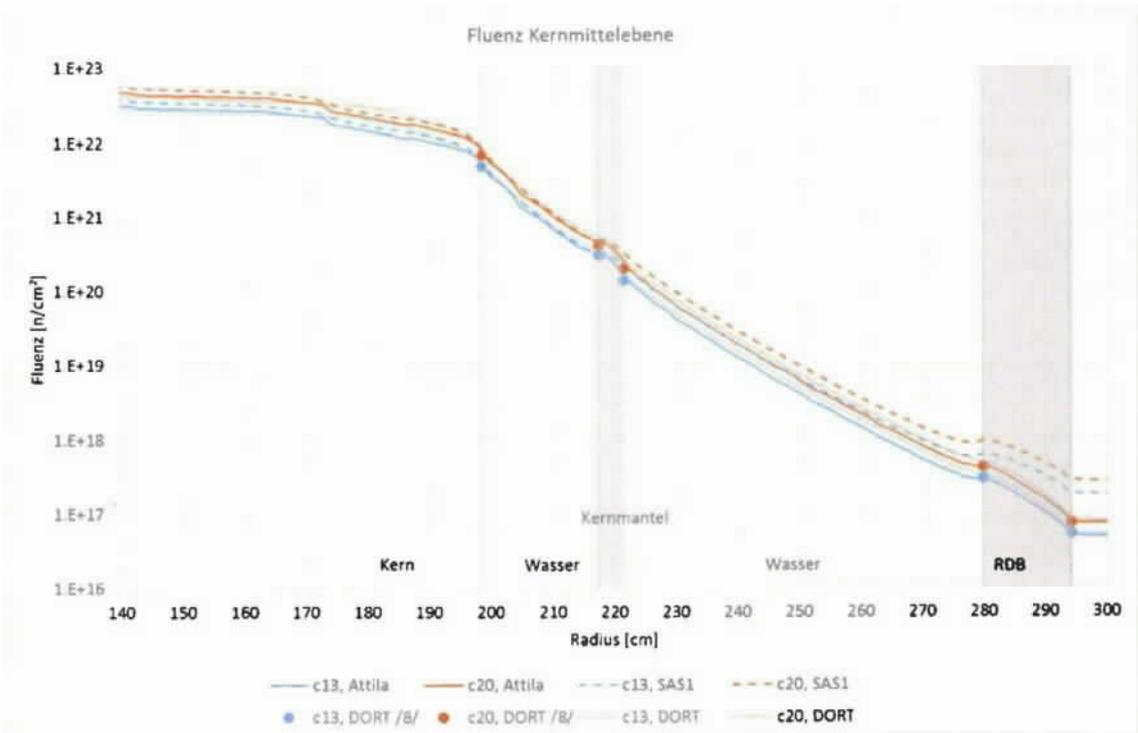


Abbildung 4: Fluenzen schneller Neutronen in der Kernmittelebene; berechnet mit SAS1 (gestrichelte Kurven), DORT (gepunktete Kurven) und Attila (durchgezogene Kurven) im Vergleich mit DORT /8/ (Punkte)

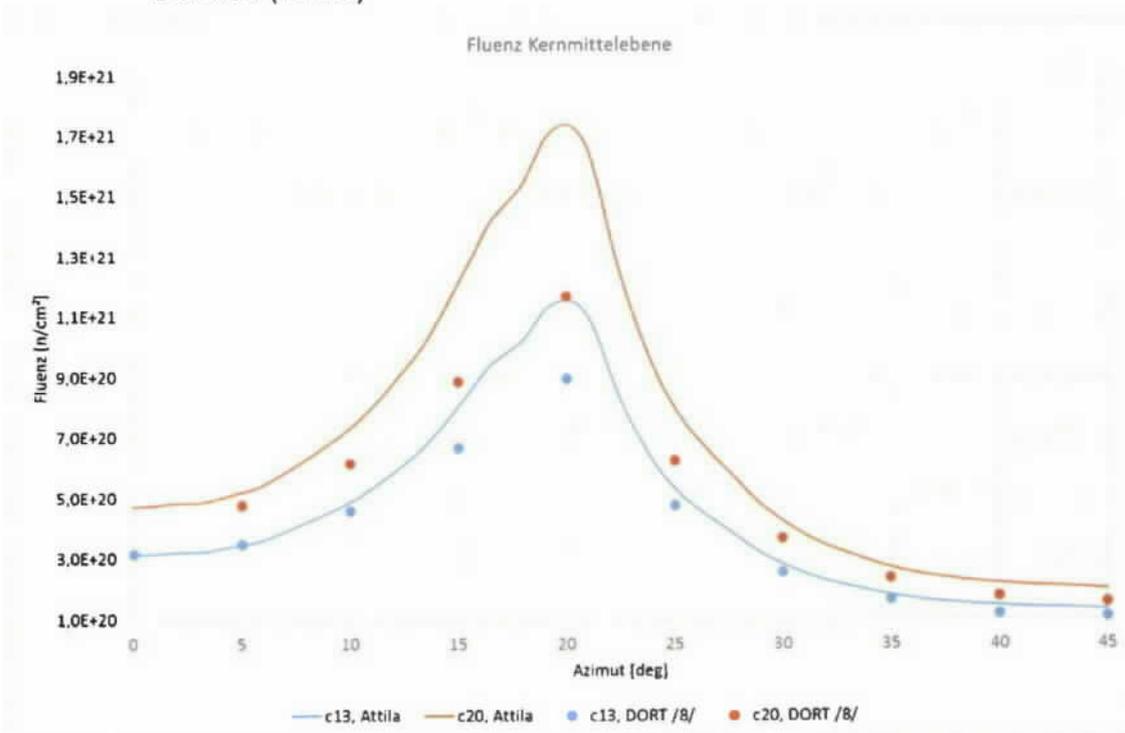


Abbildung 5: Azimutaler Fluenzverlauf gemäß Attila (durchgezogene Kurven) verglichen mit DORT gemäß /8/ (Punkte)

Ein Vergleich des azimutalen Fluenzverlaufs in der Kernmittelebene zeigt (Abbildung 5), dass Attila (durchgezogene Kurven) eine deutlich ausgeprägtere Abhängigkeit vom Azimut berechnet als die DORT-Rechnungen /8/ (Punkte).

### 3.2 Vergleich verschiedener Programme

Um methodische Fehler bei der Berechnung zu vermeiden, wurden die Flussdichten mit den Programmen SAS1, DORT und Attila bestimmt, die jeweils ein-, zwei- bzw. dreidimensional rechnen. Da die zugrunde liegenden Querschnittsbibliotheken eine jeweils unterschiedliche Energiegruppenstruktur aufweisen, werden die totalen Neutronenflussdichten verglichen.

#### 3.2.1 Radialer Flussdichteverlauf in der Kernmittelebene

In Abbildung 6 ist der radiale Verlauf der totalen Neutronenflussdichte in der Kernmittelebene gezeigt. Erkennbar ist, dass SAS1 wieder tendenziell höhere Werte berechnet als Attila oder DORT. Die Ergebnisse aus Attila und DORT stimmen gut überein. Trotz gleicher Eingangsdaten ergeben sich dennoch Unterschiede in der berechneten Flussdichte, die radial bereits etwa einen Faktor 3 ausmachen können. Die Unterschiede liegen dabei sowohl in den Wirkungsquerschnitten als auch in der Numerik der jeweiligen Programme begründet.

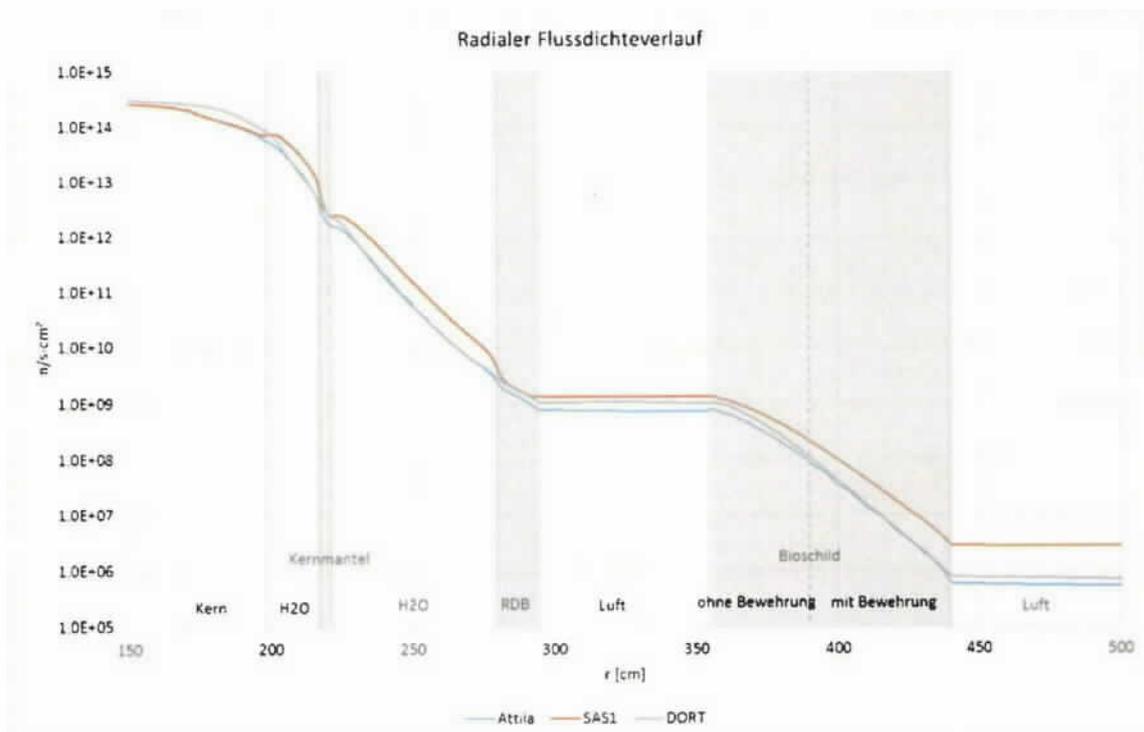


Abbildung 6: Radialer Verlauf der totalen Neutronenflussdichte in der Kernmittelebene

### 3.2.2 Axialer Flussdichteverlauf auf der Symmetrieachse

In Abbildung 7 ist der axiale Verlauf der totalen Neutronenflussdichte oberhalb der Kernmittelebene gezeigt. Die Kernmittelebene ist hierbei  $z=0$  und im Bereich  $z=1380$  liegt der RDB-Deckel.

Wieder liegen die SAS1-Ergebnisse zunächst über denen von Attila und DORT. Im Bereich der Zykclone ändert sich der Flussdichteverlauf jedoch deutlich. Da SAS1 im eindimensionalen Modell keine Effekte durch Wiedereinstreuung berücksichtigen kann, nimmt die Flussdichte weiter ab. Wird dieser Effekt wie in Attila oder DORT berücksichtigt, wird erkennbar, dass die Neutroneneinstreuung von außen den Abfall der direkt vom Kern ausgehenden Flussdichte schließlich überkompensiert. Dabei können die Unterschiede zwischen Attila und DORT bereits einen Faktor 10 ausmachen.

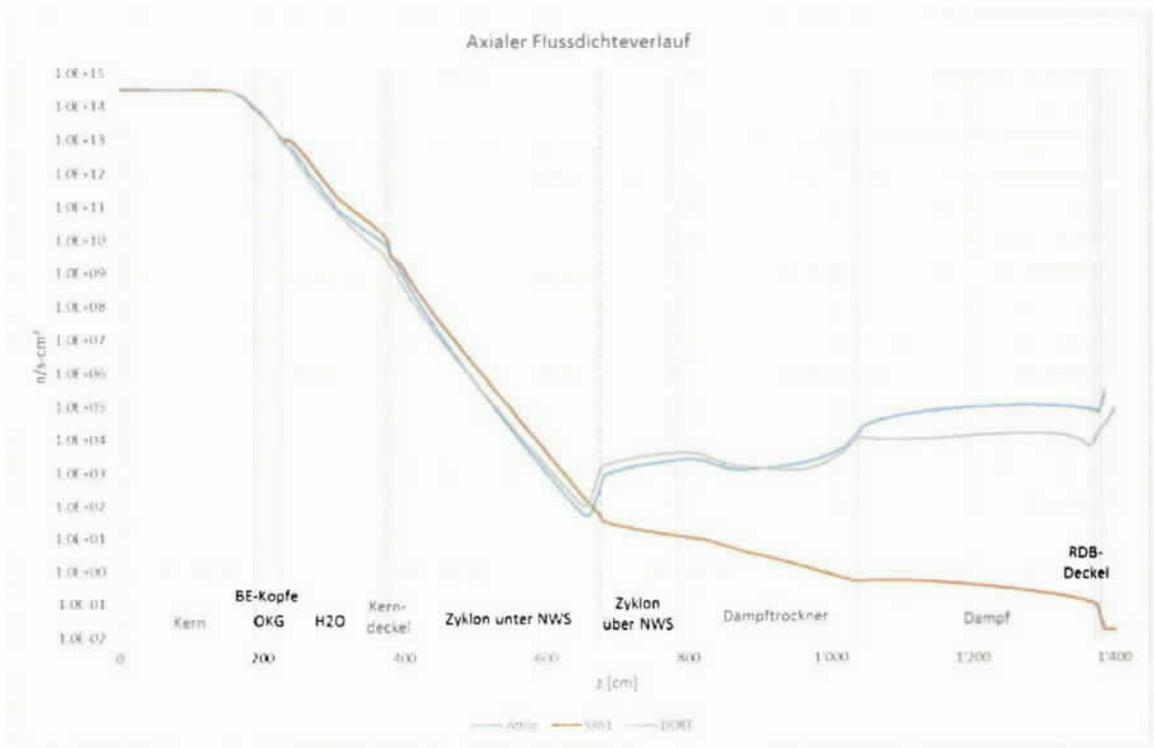


Abbildung 7: Axialer Verlauf der totalen Neutronenflussdichte

Einen Überblick über die Verteilung der totalen Neutronenflussdichte im 3D-Modell gibt Abbildung 8.

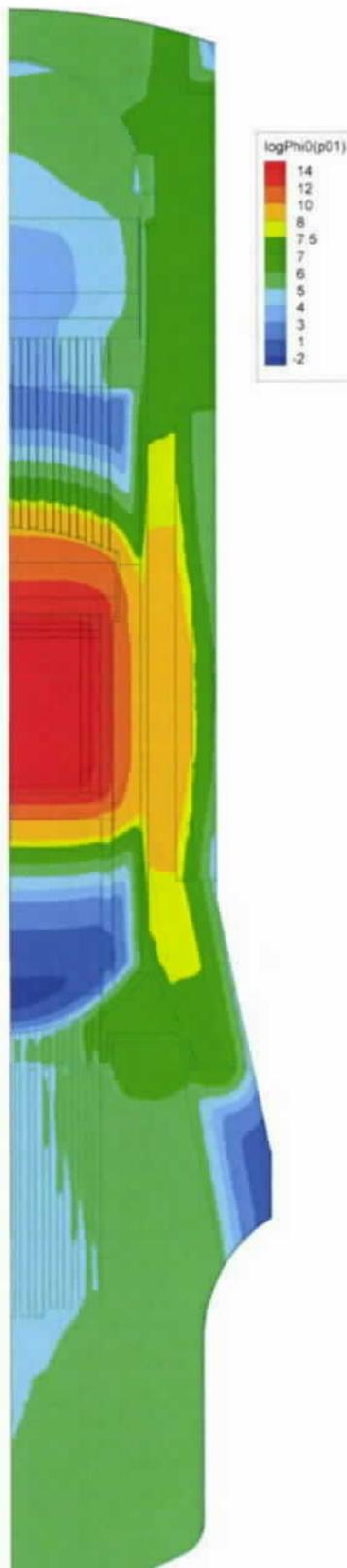


Abbildung 8: Logarithmische Neutronenflussdichteverteilung als Falschfarbendarstellung nach Attila

#### 4 Berechnung der spezifischen Aktivität

Die in Abschnitt 3 berechneten Neutronenflussdichten wurden auf drei Energiegruppen mit folgender Struktur kondensiert:

Thermisch	$E < 0,5 \text{ eV}$
Epithermisch	$0,5 \text{ eV} < E < 0,1 \text{ MeV}$
Schnell	$E > 0,1 \text{ MeV}$

Anschließend wurde für jede Komponente der RDB-Einbauten, des RDB und des Bioschilds die spezifische Aktivität mit dem DSR-Aktivierungsprogramm /2/ berechnet. In die Berechnung gehen die abgeleitete Betriebshistorie des KKB und die gemittelten komponentenspezifischen chemischen Zusammensetzungen ein.

Im Folgenden werden die betrachteten Nuklide, ein Abgleich mit Messdaten sowie ausgewählte Aktivierungsergebnisse vorgestellt. Weitere Ergebnisse können mit dem Excel-Makro (vgl. Anhang L) erzeugt werden.

#### 4.1 Nuklidauswahl

Die Auswertung im Makro und im Bericht bezieht sich auf eine Auswahl von Nukliden: Fe55, Co60, Mn54, Ni59, Ni63 und Nb94 für Stahl und Fe55, Co60, Mn54, Eu152, Eu154 und H3<sup>2</sup> für Beton. Diese Nuklide machen bereits zwei Jahre nach Beendigung des Leistungsbetriebs fast das gesamte Aktivitätsinventar aus der neutroneninduzierten Aktivierung aus, da der Rest auf Grund kurzer Halbwertszeiten abgeklungen ist. Ein Überblick über verschiedene Bildungsreaktionen ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Bildungsreaktionen wesentlicher Nuklide

Nuklid	Bildungsreaktion	Zerfallsart	Halbwertszeit	Strahlung [E <sub>γ</sub> in MeV]
Fe-55	Fe-54 + n Fe-56 (n,2n) Ni-58 (n,α)	Elektroneneinfang (E)	2,7 a	kein γ
Co-60	Co-59 + n Ni-60 (n,p) Cu-63 (n,α)	β <sup>-</sup>	5,26 a	1,333 / 1,173
Ni-63	Ni-62 + n Ni-64 (n,2n) Cu-63 (n,p)	β <sup>-</sup>	92 a	kein γ

<sup>2</sup> Aufgrund der hohen Mobilität von H3 sind die Ergebnisse für H3 nur als Indikation zu verstehen.

Ni-59	Ni-58 + n Ni-60 (n,2n)	E	8E+04 a	kein $\gamma$
Nb-94	Mo-94 (n,p) Nb-93 + n	$\beta^-$	2E+04 a	0,70 / 0,87
Mn-54	Fe-54 (n,p) Mn-55 (n,2n)	E	313d	0,835
H-3	H-2 + n	$\beta^-$	12,3 a	kein $\gamma$
Eu-152	Eu-151 + n	E / $\beta^-$ 24%	13,6 a	... 1,41 ...
Eu-154	Eu-153 + n	$\beta^-$	8 a	... 0,72 ...

#### 4.2 Abgleich mit Messdaten

Um systematische Abweichungen zwischen Rechenergebnis und Wirklichkeit zu erfassen, sollten die Aktivierungsergebnisse mit Messergebnissen abgeglichen werden. Dazu stand bisher eine Aktivitätsbestimmung des Behälters der Voreilprobe 1 aus dem Jahr 1988 zur Verfügung /10/. Ferner gibt es Beprobungsergebnisse von einem ausgebauten Wasserkasten /11/ und von einem ausgetauschten Thermosleeve /12/.

Zum Abgleich eignen sich besonders die gut messbaren Nuklide Co60 und Mn54. Da Co60 vorwiegend thermisch aktiviert wird und Mn54 vorwiegend durch schnelle Neutronen, kann das gesamte Neutronenspektrum gut abgeglichen werden.

Als Voraussetzung für einen Vergleich zwischen Rechnung und Messergebnis sind neben der Bestrahlungshistorie auch Kenntnisse zu Position (Abbildung 9) und chemischer Zusammensetzung des Probenmaterials notwendig. Letzteres ist für die Wasserkastenprobe nicht gegeben. Für die Probe ist nur der Stahlschlüssel 1.4541 gegeben, aber keine Aussage zum Co-Gehalt. Daher wurde der typische Anteil von 200 ppm angenommen, um zu sehen, ob die Ergebnisse vergleichbar sind.

Tabelle 4 zeigt die Messergebnisse im Vergleich zur Rechnung. Das Rechenergebnis für den Behälter der Voreilprobe 1 unterschätzt Mn54 etwa um den Faktor 2, was mit der Modellierung der Betriebshistorie im Verhältnis zur kurzen Halbwertszeit des Mn zusammenhängt. Co60 war für die Probe nicht analysiert worden.

Die Berechnungen für den Thermosleeve liegen jeweils eine Größenordnung über den Beprobungsergebnissen. Geometrisch befindet sich die Thermosleeveprobe auf Höhe der RDB-Außenseite (vgl. Abbildung 9). Da die Stützen im Rechenmodell nicht explizit enthalten sind, fehlt im Modell im Vergleich zur Realität an der Stelle der Stützenprobe somit etwa 15 cm Stahlabschirmung. Daher fällt das Rechenergebnis höher aus als die Messung. Wie Abbildung 12 jedoch zu entnehmen ist, deckt sich der Unterschied von einer Größenordnung mit dem Verlauf der spezifischen Aktivität im RDB-Mantel auf der Kote der Stützenprobe. Vom Minimum der Co-Kurve in Abbildung 12 bis zur RDB-Außenseite sind es etwa 12 cm und der Unterschied der spezifischen Aktivität liegt bereits hier bei einer Größenordnung.

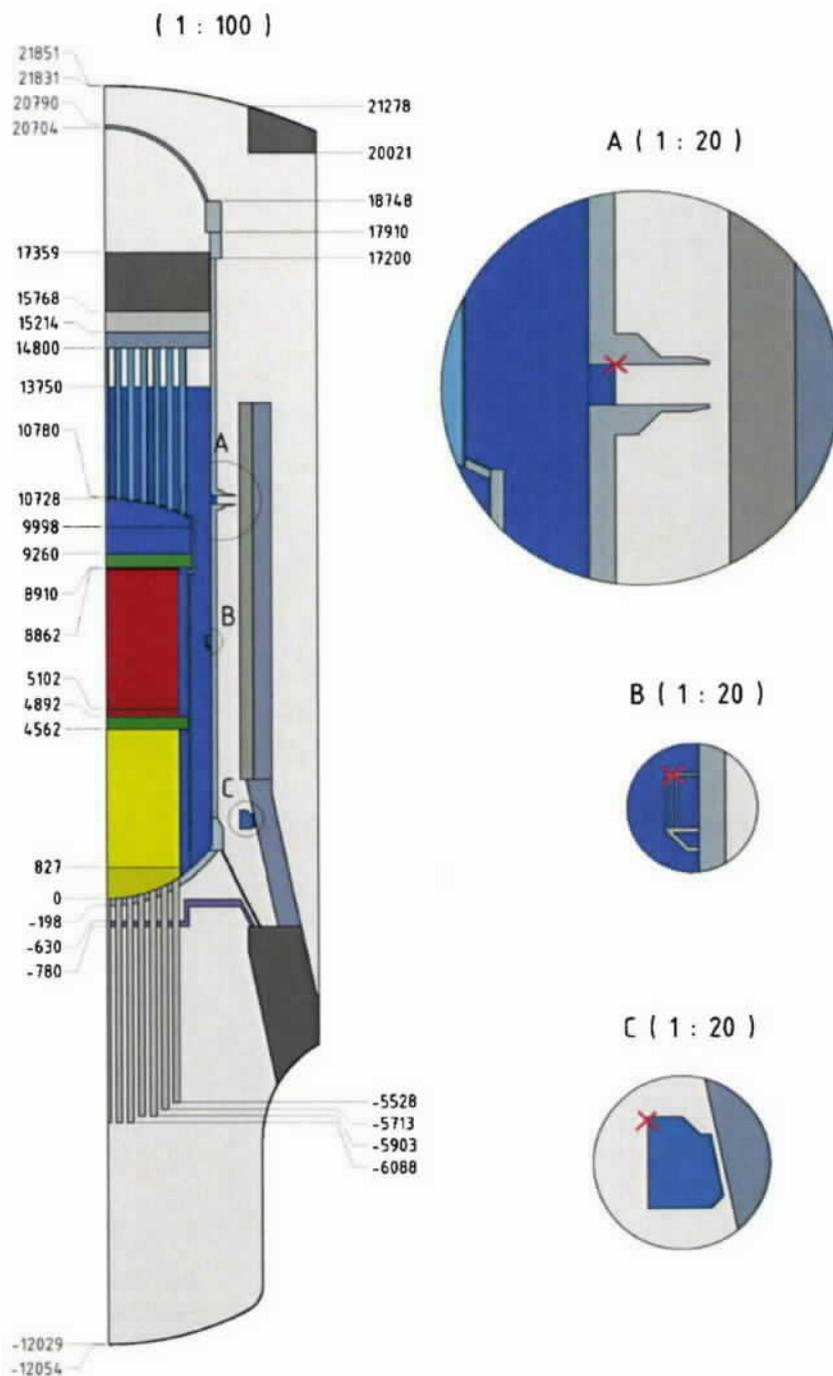


Abbildung 9: Probenahmeorte

Beim Wasserkasten ist der Co-Gehalt unbekannt, aber die Annahme von 200 ppm Co ergibt nur einen Unterschied Faktor 2,5 zwischen Rechnung und Messung.

Auf Basis der aktuellen Vergleichsmöglichkeiten scheinen die Rechenergebnisse die tatsächlichen Verhältnisse der spezifischen Aktivitäten adäquat wiederzugeben. Eine endgültige Entscheidung darüber kann nach Vorlage weiterer und „repräsentativerer“ Proben getroffen werden.

Tabelle 4: Probenergebnisse

Probe	Bezugsdatum	Analysergebnis [Bq/g]		Rechnung [Bq/g]	
		Mn54	Co60	Mn54	Co60
Beh. Voreilprobe 1	01.05.1987	189000	-	96000	-
Thermosleeve	10.06.2014	0,164	260	1,152	2907
Wasserkasten	17.06.2014	-	610	-	247

### 4.3 Ausgewählte Aktivierungsergebnisse

Abbildung 10 zeigt den Verlauf der spezifischen Aktivitäten entlang der z-Achse (RDB-Mittelachse), wobei  $z=0$  cm die Innenseite der RDB-Bodenkalotte ist. Zur leichteren Orientierung wurden die verschiedenen Bereiche in Abbildung 10 von Hand hervorgehoben.

Im Bereich der Steuerstabführungsrohre ( $z=0\dots456,2$  cm) ist, vom Kern ausgehend, ein starker Abfall der Aktivierung zu erkennen. Zum einen nimmt die Neutronenflussdichte aus geometrischen Gründen mit zunehmendem Abstand vom Kern ab. Zum anderen schirmt das Wasser ab. Zusätzlich ist im Modell im Bereich  $z=82,7\dots456,2$  cm Bor aus den Steuerstäben enthalten, welches auf das entsprechende Volumen homogenisiert wurde und zusätzlich als Neutronensenke wirkt. Der resultierende Abfall der spezifischen Aktivitäten ist daher recht ausgeprägt.

Die spezifische Aktivität nimmt ausgehend von diesem Minimum im RDB-Boden nach außen hin wieder zu und erreicht unterhalb des RDB in den Steuerstabführungsrohren in etwa ein gleichbleibendes Niveau. Dieser Verlauf der spezifischen Aktivität resultiert aus gestreuten Neutronen, die auf dem Weg zwischen RDB und Bioschild in den Bereich unterhalb des RDB gelangen (vgl. Abbildung 8).

Auch oberhalb des Kerns nimmt die spezifische Aktivität zunächst stark ab, steigt dann jedoch durch die von außen in den RDB zurück eingestreuten Neutronen wieder an.

Einen Ausschnitt aus Abbildung 10 zeigt Abbildung 11. Gezeigt ist die spezifische Aktivität im RDB-Deckel. Anhand des Vorkommens von Nb94 und des Sprunges in den anderen Kurven ist erkennbar, dass sich die Materialzusammensetzung ändert. So enthält die Plattierung beispielsweise Nb, nicht aber der RDB-Grundwerkstoff. Ferner ist erkennbar, dass die Aktivierung (bei gleichem Material) außen stärker ist als innen, was mit den oben beschriebenen Streueffekten zu erklären ist.

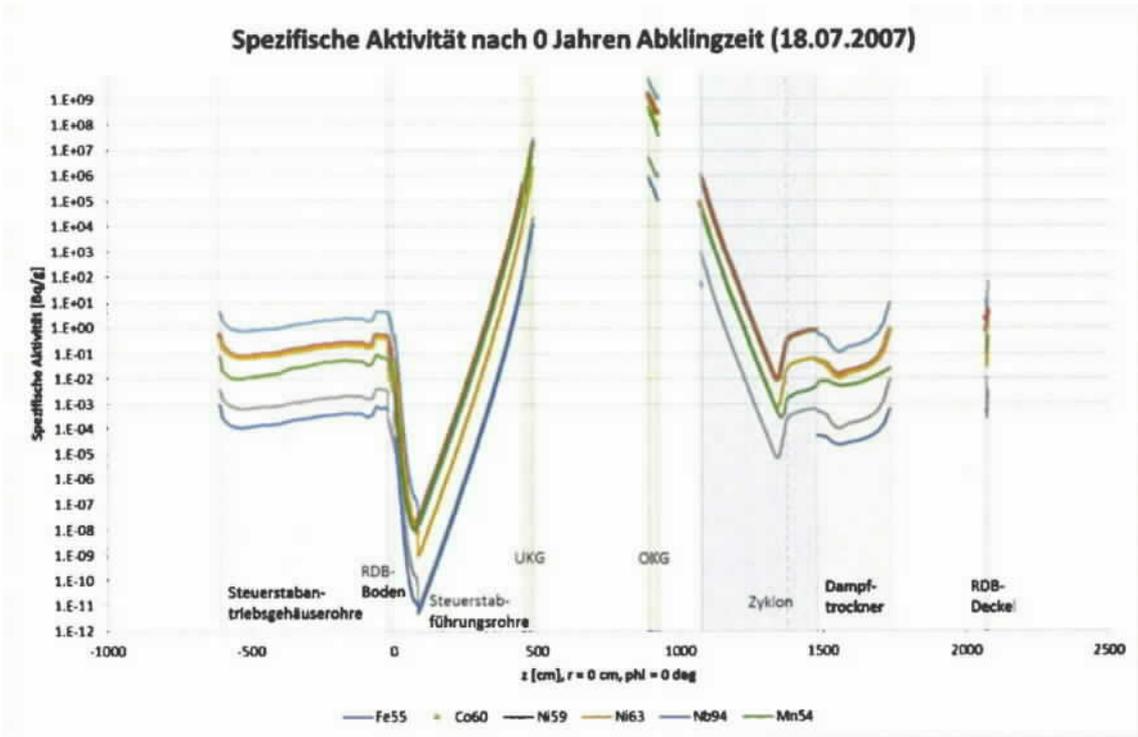


Abbildung 10: Axialer Verlauf der spezifischen Aktivitäten zum Abschaltzeitpunkt

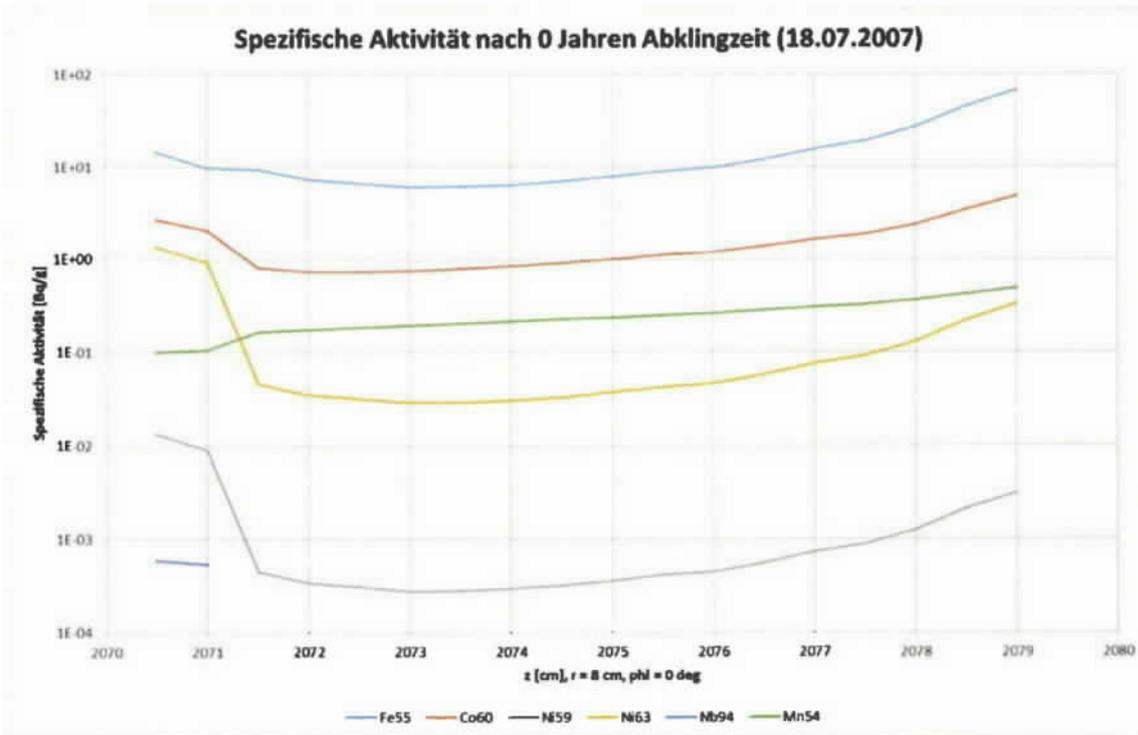


Abbildung 11: Verlauf der spezifischen Aktivität im RDB-Deckel

In Abbildung 12 ist der radiale Verlauf der spezifischen Aktivitäten im Bereich der Zyclone dargestellt. Die Zyclone wurden als Hohlrohre modelliert. Zur besseren Veranschaulichung wurde in Abbildung 12 der Verlauf der spezifischen Aktivität zwischen den Rohren und innerhalb der Rohre von Hand entfernt, da sich dort nur Wasser befindet und dieser somit keine „echte“ spezifische Aktivität darstellt. Das Excel-Makro erzeugt jedoch für die Zyclone eine durchgehende Kurve (vgl. Anhang F).

Außerhalb der Zyclonrohre ist noch der Verlauf der spezifischen Aktivitäten im RDB zu erkennen. Bei der dargestellten Höhe  $z=1200$  cm ist die Rückstreuung der Neutronen von außen bereits so maßgeblich, dass die Aktivierung des RDB-Grundwerkstoffs an der Außenseite höher ist als innen.

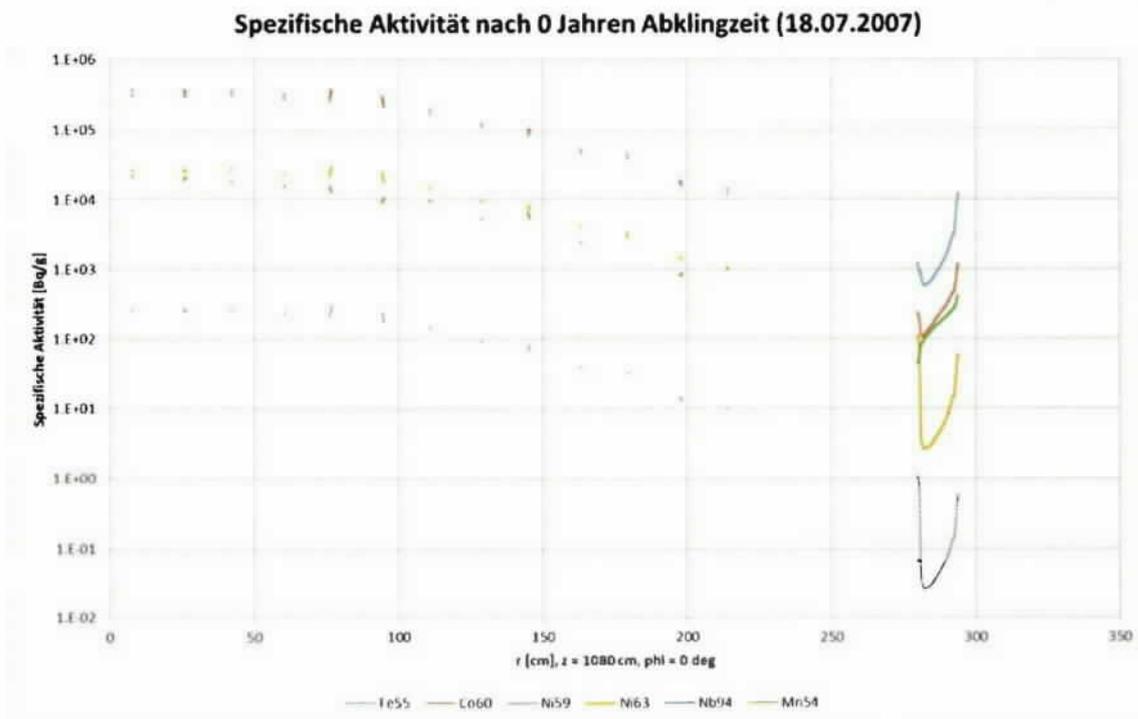


Abbildung 12: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich der Zyclone

Abbildung 13 zeigt den radialen Verlauf der spezifischen Aktivitäten im Bereich der Steuerstabantriebsgehäuserohre. Die Rohre wurden als Stahl-Wasser-Gemisch modelliert. Zwischen den Rohren befindet sich Luft, so dass die spezifische Aktivität für diese Bereiche irrelevant ist. Innerhalb der Rohre gibt es ein Minimum. Je weiter außen sich ein Rohr befindet, desto ausgeprägter ist die Aktivierung an der „Außenseite“. Die Bereiche zwischen den Rohren wurden in Abbildung 13 zur besseren Übersichtlichkeit von Hand entfernt. Das Excel-Makro erzeugt eine durchgehende Kurve, so dass die Ergebnisse zwischen den Rohren zu ignorieren sind (vgl. Anhang G).

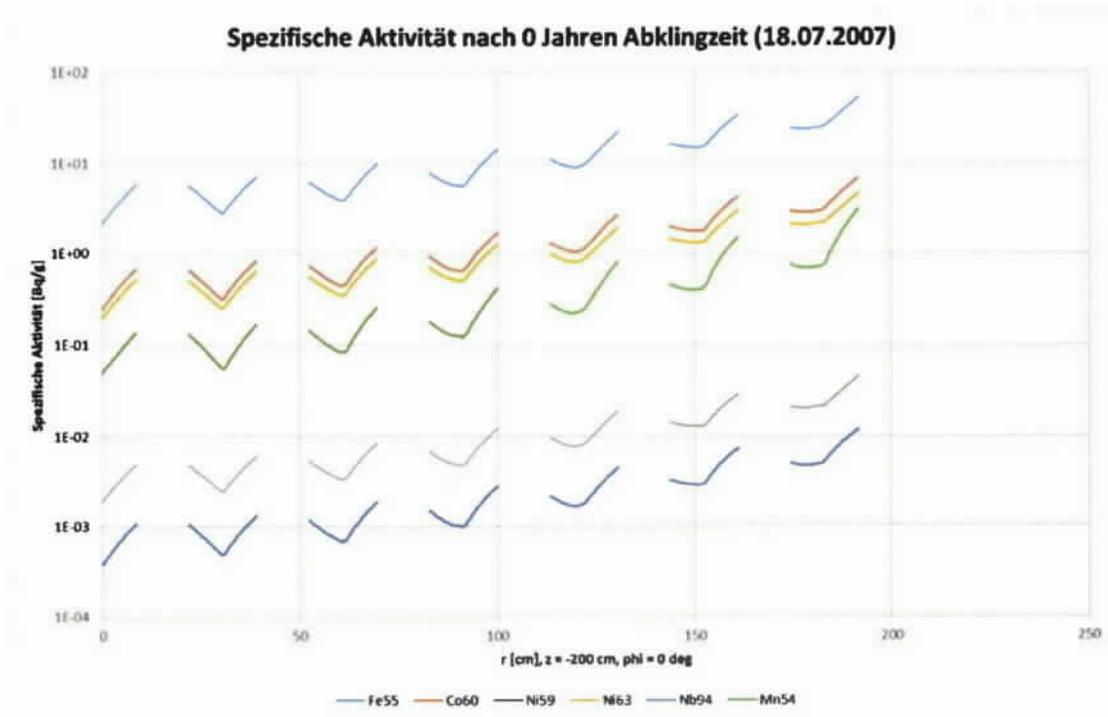


Abbildung 13: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich der Steuerstabantriebsgehäuserohre

Abbildung 14 zeigt die azimuthale Abhängigkeit der spezifischen Aktivität am Beispiel des Kernmantels auf Höhe der Kernmittelebene.

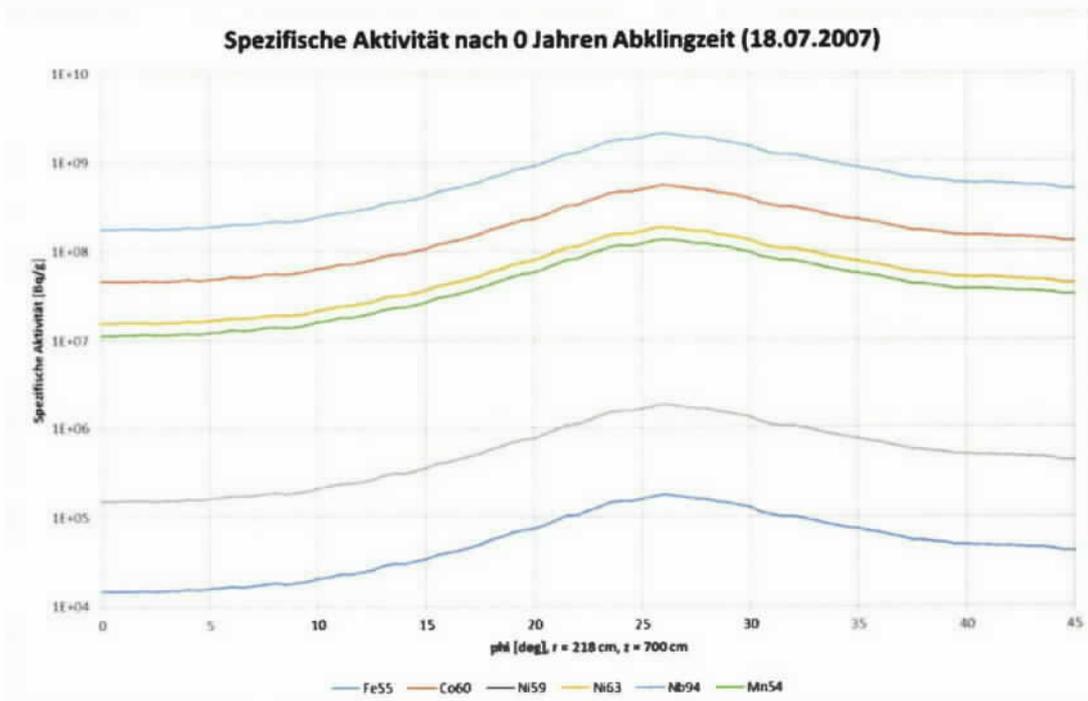


Abbildung 14: Azimutaler Verlauf der spezifischen Aktivität im Kernmantel auf Höhe der Kernmittelebene

#### 4.4 Gesamtaktivität

Basierend auf den errechneten spezifischen Aktivitäten kann eine mittlere (durchschnittliche) spezifische Aktivität für bestimmte Komponenten des Reaktors bzw. des Bioschildes angegeben werden. In Verbindung mit der Masse dieser Komponenten ergibt sich die Gesamtaktivität. In Tabelle 5 ist eine Zusammenfassung der durchschnittlichen spezifischen Aktivität verschiedener Komponenten und die sich ergebende Gesamtaktivität gegeben. Eine Übersicht hierüber gibt Abbildung 15. Diese „durchschnittlichen“ spezifischen Aktivitäten wurden konservativ ermittelt, indem der größte Mittelwert aus mehreren vertikalen Schnitten durch die jeweilige Komponente – unter Berücksichtigung der azimutalen Ausprägung – für die ganze Komponente angesetzt wurde.

Tabelle 5: Durchschnittliche spezifische Aktivität und Gesamtaktivität verschiedener Komponenten zum Bezugsdatum 30.06.2015

Pos.	Komponente	Masse [Mg]	Spez. Aktivität [Bq/g]		Aktivität [Bq]	
			Co60	Gesamt	Co60	Gesamt
1	RDB				2,4E+12	1,0E+13
1.1	RDB-Deckel	69	2,5E+00	1,1E+01	1,7E+08	7,6E+08
1.2	RDB-Mantel oberhalb des Bioschildes	101	3,4E+01	1,8E+02	3,4E+09	1,8E+10
1.3	RDB-Mantel oberh. Spaltzone bis Oberkante Bioschild	98	1,1E+03	5,3E+03	1,1E+11	5,2E+11
1.4	RDB-Mantel Höhe Spaltzone	82	2,7E+04	1,1E+05	2,2E+12	9,0E+12
1.5	RDB-Mantel unterhalb Spaltzone	84	1,1E+03	4,9E+03	9,2E+10	4,1E+11
1.6	RDB-Bodenkalotte	79	7,5E+00	3,5E+01	5,9E+08	2,8E+09
1.7	Zwangsumwälzpumpen <sup>3</sup>	33	6,2E+00	2,9E+01	2,0E+08	9,6E+08
2	Dampftrockner	30	4,9E-01	3,3E+00	1,5E+07	9,9E+07
3	Dampf-Wasser-Abscheider	65			1,0E+12	1,7E+12
3.1	Zyklone	30 <sup>4</sup>	4,1E+00	6,4E+00	1,2E+08	1,9E+08
3.2	Kerndeckel + Deckelstandrohre	35 <sup>4</sup>	2,9E+04	4,9E+04	1,0E+12	1,7E+12

<sup>3</sup> Die Zwangsumwälzpumpen waren nicht in den Modellen für die Flussdichteberechnung enthalten. Die spezifische Aktivität wurde mit der an dieser Position vorherrschenden Flussdichte und der Stahlzusammensetzung 1.4550 mit 200 ppm Co-Gehalt abgeschätzt.

<sup>4</sup> Die Masseverteilung auf Zykclone und Kerndeckel+Deckelstandrohre wurde abgeschätzt

4	Speisewasserverteiler <sup>5</sup>	2	3,1E+01	2,8E+02	6,2E+07	5,6E+08
5	Kernmantel	43	9,3E+06	2,3E+07	4,0E+14	9,9E+14
6	Oberes Kerngitter	5	6,4E+08	2,2E+09	3,2E+15	1,1E+16
7	Unteres Kerngitter	6	2,6E+06	5,0E+06	1,6E+13	3,0E+13
8	Steuerstabführungsrohre + Kernflussmessgehäuserohre	23	3,8E+03	5,2E+03	8,7E+10	1,2E+11
9	Steuerstabantriebs- gehäuserohre	44	3,1E+00	1,8E+01	1,4E+08	7,9E+08
10	Standzarge <sup>6</sup>	27	1,3E+02	8,8E+02	3,5E+09	2,4E+10
11	Abschirmplatte <sup>6</sup>	69	2,9E+01	4,2E+01	2,0E+09	2,9E+09
12	Bioschild inkl. Bewehrung				6,1E+10	6,1E+11
12.1	Beton	810	3,4E+01	4,2E+02	2,8E+10	3,4E+11
12.2	Bewehrung	70	4,8E+02	3,9E+03	3,4E+10	2,7E+11
	Summe Pos. 1 - 12	1740			3,6E+15	1,2E+16

<sup>5</sup> Der Speisewasserverteiler war nicht in den Modellen für die Flussdichteberechnung enthalten. Die spezifische Aktivität wurde mit der an dieser Position vorherrschenden Flussdichte und der Stahlzusammensetzung 1.4550 mit 200 ppm Co-Gehalt abgeschätzt.

<sup>6</sup> Angenommene Stahlsorte: 1.0037 mit 200 ppm Co-Gehalt

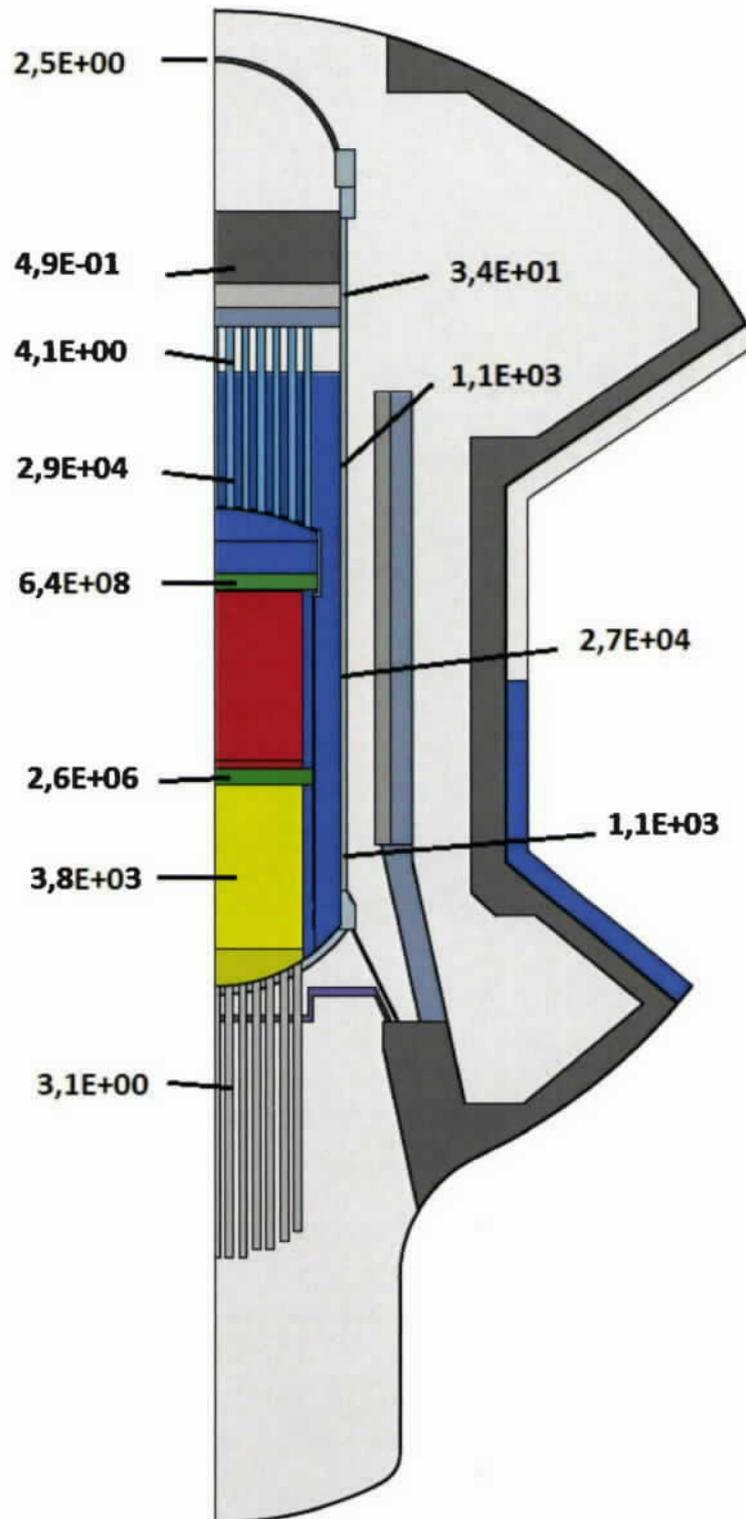


Abbildung 15: Übersicht über die Verteilung der mittleren spezifischen Co-60-Aktivitäten zum Bezugszeitpunkt 30.06.2015; Angaben in Bq/g

## 5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurde die Vorgehensweise zur Ermittlung der neutroneninduzierten spezifischen Aktivitäten für den Reaktor des KKW Brunsbüttel beschrieben. Betrachtet wurden der RDB, die RDB-Einbauten und der Biologischen Schild. Die Ergebnisse wurden in einem Excel-Makro zusammengefasst, mit dem in dreidimensionaler Geometrie die spezifischen Aktivitäten für verschiedene Raumbereiche ausgegeben werden können.

Eine Prüfung der Rechnungen auf Plausibilität erfolgte durch Vergleich mit in der Vergangenheit durchgeführten Fluenzberechnungen sowie durch einen Vergleich mit Ergebnissen verschiedener Rechenprogramme. Ferner wurden Aktivierungsergebnisse mit Beprobungsergebnissen verglichen. Die Rechnung und die Messung stimmen gut überein.

Die Auswahl der im Bericht dargestellten Nuklide beschränkt sich dabei auf Co60, Fe55, Mn54, Ni59, Ni63 und Nb94 für Stahlkomponenten und zusätzlich H3, Eu152 und Eu154 für Beton. Diese spiegeln bereits zwei Jahre nach Abschalt datum fast das gesamte Aktivitätsinventar wieder. Die Gesamtaktivität dieser Nuklide beläuft sich für den RDB, die RDB-Einbauten und den Biologischen Schild auf  $1,2E+16$  Bq zum Bezugsdatum 30.06.2015.

## 6 Literaturverzeichnis

- /1/ Attila 8.0.0, Transpire Inc.
- /2/ Programmbeschreibung DSR-Aktivierungsprogramm
- /3/ Ausgangsdaten des AG
- /4/ DIN 25413-1, Klassifikation von Abschirmbetonen nach Elementanteilen – Teil 1: Abschirmung von Neutronenstrahlung, April 2013
- /5/ Scale 6.1, Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, June 2011, ORNL/TM-2005/39
- /6/ TORT-DORT, DORT, 1-D 2-D Discrete Ordinate Neutron and Photon Transport with Deep Penetration, 13.12.1993
- /7/ Technischer Bericht – Neutronenaktivierung im Reaktorgebäude KKB, Revision 0, Stefan Fuck, 30.6.2009
- /8/ Fluenzen von RDB, RDB-Einbauten und Magazin 2 zum Ende des 20. Betriebszyklus und nach 32 und 60 Vollastjahren, Arbeitsbericht, NEPR-G/2006/de/3525 Rev. A
- /9/ KKB-Modell.pdf, 04.06.2014
- /10/ Ergebnisse der Nachuntersuchung von bestrahlten Überwachungsproben für den Druckbehälterstahl 22NiMoCr37 des Kernkraftwerks Brunsbüttel, GKSS 88/V/1
- /11/ Sonderanalysenprotokoll, Wasserkasten\_17062014\_3, 17.06.2014
- /12/ Sonderanalysenprotokoll, TK-Stützen\_10062014, 10.06.2014
- /13/ „KKB, Datensatz für den Programmcode ATHLET, Version 2.1 A“, KKB, Technischer Bericht 1998-0062, Rev. B vom 29.02.2008

## 7 Abbildungsverzeichnis

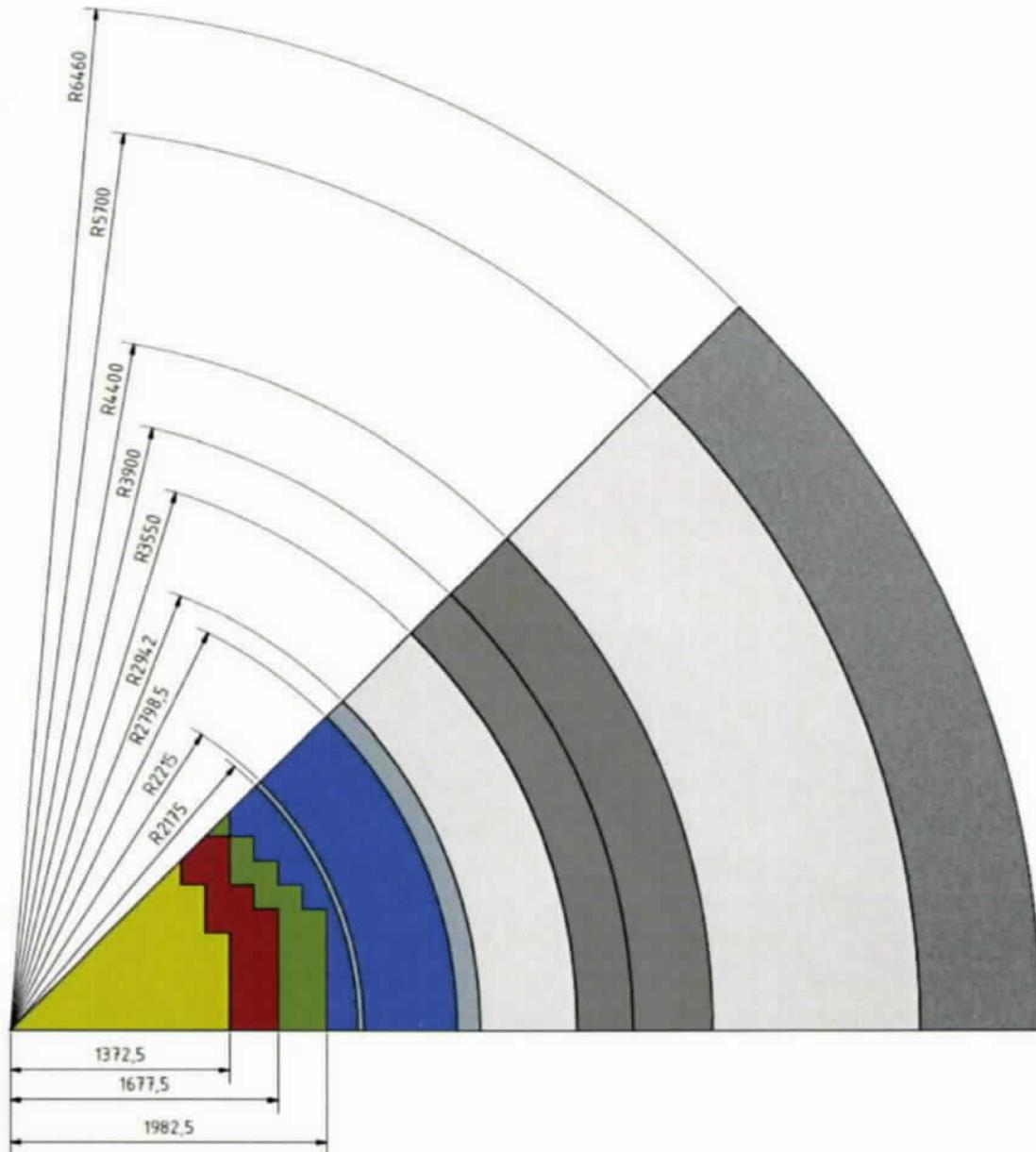
	Seite
Abbildung 1: Einfluss der Betriebshistorienmodellierung der Jahre bis 1995 auf die berechnete spezifische Aktivität zum Betriebsende	5
Abbildung 2: Längsschnitt durch das Rechenmodell (Höhenangaben in mm)	7
Abbildung 3: Verlauf der Wasserdichten im Modell; Angaben in g/cm <sup>3</sup>	9
Abbildung 4: Fluenzen schneller Neutronen in der Kernmittelebene; berechnet mit SAS1 (gestrichelte Kurven), DORT (gepunktete Kurven) und Attila (durchgezogene Kurven) im Vergleich mit DORT /8/ (Punkte)	13
Abbildung 5: Azimutaler Fluenzverlauf gemäß Attila (durchgezogene Kurven) verglichen mit DORT gemäß /8/ (Punkte)	13
Abbildung 6: Radialer Verlauf der totalen Neutronenflussdichte in der Kernmittelebene	14
Abbildung 7: Axialer Verlauf der totalen Neutronenflussdichte	15
Abbildung 8: Logarithmische Neutronenflussdichteverteilung als Falschfarbendarstellung nach Attila	16
Abbildung 9: Probenahmeorte	19
Abbildung 10: Axialer Verlauf der spezifischen Aktivitäten zum Abschaltzeitpunkt	21
Abbildung 11: Verlauf der spezifischen Aktivität im RDB-Deckel	21
Abbildung 12: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich der Zyklone	22
Abbildung 13: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich der Steuerstabantriebsgehäuserohre	23
Abbildung 14: Azimutaler Verlauf der spezifischen Aktivität im Kernmantel auf Höhe der Kernmittelebene	23
Abbildung 15: Übersicht über die Verteilung der mittleren spezifischen Co-60-Aktivitäten zum Bezugszeitpunkt 30.06.2015; Angaben in Bq/g	26

## 8 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Quellverteilung; Angaben in Neutronen/s	8
Tabelle 2: Vergleich der berechneten Fluenzen schneller Neutronen nach dem 13. und 20. Zyklus; Angaben in Neutronen/cm <sup>2</sup>	12
Tabelle 3: Bildungsreaktionen wesentlicher Nuklide	17
Tabelle 4: Probenergebnisse	20
Tabelle 5: Durchschnittliche spezifische Aktivität und Gesamtaktivität verschiedener Komponenten zum Bezugsdatum 30.06.2015	24

## Anhang

### Anhang A: Radiale Aufteilung des Kerns zur Erfassung der Leistungsdichteverteilung



Anhang B: Zusammengefasste Leistungshistorie KKB

Zyklus	Anfang	Ende	Leistungs- niveau
1A	11.07.1976	22.07.1976	46%
	10.08.1976	24.08.1976	46%
	30.08.1976	31.08.1976	46%
	01.09.1976	14.09.1976	46%
	20.09.1976	30.09.1976	46%
	07.10.1976	31.10.1976	46%
	22.11.1976	30.11.1976	46%
	01.12.1976	03.12.1976	46%
	08.12.1976	31.12.1976	46%
	01.01.1977	21.01.1977	93%
	03.02.1977	28.02.1977	93%
		31.03.1977	93%
	01.04.1977	03.04.1977	93%
	06.04.1977	30.04.1977	93%
		31.05.1977	93%
		30.06.1977	93%
	01.07.1977	07.07.1977	93%
	05.08.1977	31.08.1977	93%
	21.01.1978	31.01.1978	91%
	01.02.1978	24.02.1978	91%
	03.03.1978	31.03.1978	91%
		30.04.1978	91%
		31.05.1978	91%
	01.06.1978	18.06.1978	91%
1B	23.08.1980	27.08.1980	64%
	01.11.1980	11.11.1980	64%
	17.11.1980	30.11.1980	64%
		31.12.1980	64%
	01.01.1981	31.01.1981	81%
		28.02.1981	81%
		31.03.1981	81%
	01.04.1981	15.04.1981	81%
	16.04.1981	24.04.1981	81%
	30.04.1981	30.04.1981	81%
		31.05.1981	81%
		30.06.1981	81%
		31.07.1981	81%
	01.08.1981	20.08.1981	81%
	2	07.10.1981	31.10.1981
		30.11.1981	81%
		31.12.1981	81%
		31.01.1982	89%
		28.02.1982	89%
		31.03.1982	89%
		30.04.1982	89%
		31.05.1982	89%
		30.06.1982	89%
		31.07.1982	89%

Zyklus	Anfang	Ende	Leistungs- niveau	
3	12.08.1983	31.08.1983	92%	
		30.09.1983	92%	
		31.10.1983	92%	
		30.11.1983	92%	
		31.12.1983	92%	
		31.01.1984	92%	
		28.02.1994	92%	
		31.03.1984	92%	
	01.04.1984	17.04.1984	92%	
	18.04.1984	30.04.1984	92%	
		31.05.1984	92%	
		30.06.1984	92%	
4	20.08.1984	30.08.1984	92%	
	02.09.1984	30.09.1984	92%	
		31.10.1984	92%	
		30.11.1984	92%	
		31.12.1984	92%	
		31.01.1985	95%	
		28.02.1985	95%	
		31.03.1985	95%	
		30.04.1985	95%	
		31.05.1985	95%	
	01.06.1985	15.06.1985	95%	
	16.06.1985	30.06.1985	95%	
5	11.08.1985	31.08.1985	95%	
		30.09.1985	95%	
		31.10.1985	95%	
		30.11.1985	95%	
		31.12.1985	95%	
		31.01.1986	97%	
		28.02.1986	97%	
		31.03.1986	97%	
		30.04.1986	97%	
	01.05.1986	22.05.1986	97%	
	23.05.1986	31.05.1986	97%	
		30.06.1986	97%	
	01.07.1986	19.07.1986	97%	
	6	25.08.1986	31.12.1986	97%
			31.01.1987	87%
		28.02.1987	87%	
		31.03.1987	87%	
		30.04.1987	87%	
		31.05.1987	87%	
	30.06.1987	87%		
	01.01.1987	24.07.1987	87%	
7	01.09.1987	30.09.1987	87%	
		31.10.1987	87%	
		30.11.1987	87%	

Anhang B (Fortsetzung): Zusammengefasste Leistungshistorie KKB

Zyklus	Anfang	Ende	Leistungs- niveau
		31.12.1987	87%
	01.01.1988	31.01.1988	84%
		29.02.1988	84%
		31.03.1988	84%
	01.04.1988	12.04.1988	84%
	13.04.1988	30.04.1988	84%
		31.05.1988	84%
		30.06.1988	84%
	01.07.1988	30.07.1988	84%
8	09.09.1988	31.12.1988	84%
		31.01.1989	77%
		28.02.1989	77%
		31.03.1989	77%
		30.04.1989	77%
		31.05.1989	77%
	01.06.1989	13.06.1989	77%
	14.06.1989	30.06.1989	77%
		31.07.1989	77%
		31.08.1989	77%
		30.09.1989	77%
	01.10.1989	07.10.1989	77%
9	04.01.1990	31.01.1990	72%
		28.02.1990	72%
	01.03.1990	14.03.1990	72%
	15.03.1990	31.03.1990	72%
		30.04.1990	72%
		31.05.1990	72%
	01.06.1990	27.06.1990	72%
	03.07.1990	31.07.1990	72%
		31.08.1990	72%
		30.09.1990	72%
		31.10.1990	72%
		30.11.1990	72%
		31.12.1990	72%
		31.01.1991	71%
		28.02.1991	71%
		31.03.1991	71%
	01.04.1991	01.04.1991	71%
10	14.07.1991	31.07.1991	71%
		31.08.1991	71%
	01.09.1991	11.09.1991	71%
	12.09.1991	30.09.1991	71%
		31.10.1991	71%
		30.11.1991	71%
		31.12.1991	71%
		31.01.1992	82%
		29.02.1992	82%
		31.03.1992	82%

Zyklus	Anfang	Ende	Leistungs- niveau
		30.04.1992	82%
	01.05.1992	10.05.1992	82%
	22.05.1992	31.05.1992	82%
		30.06.1992	82%
	01.07.1992	16.07.1992	82%
	17.07.1992	30.07.1992	82%
	30.07.1992	31.07.1992	82%
	01.08.1992	24.08.1992	82%
11	16.06.1995	31.12.1995	78%
		31.01.1996	92%
		29.02.1996	92%
		31.03.1996	92%
	01.04.1996	04.04.1996	92%
	10.04.1996	30.04.1996	85%
		31.05.1996	80%
		30.06.1996	75%
	01.07.1996	26.07.1996	65%
12	28.09.1996	30.09.1996	50%
		31.10.1996	92%
		30.11.1996	92%
		31.12.1996	92%
		31.01.1997	92%
		28.02.1997	91%
		31.03.1997	87%
		30.04.1997	74%
		31.05.1997	71%
		30.06.1997	70%
		31.07.1997	69%
		31.08.1997	63%
		30.09.1997	76%
		31.10.1997	73%
		30.11.1997	73%
		31.12.1997	70%
		31.01.1998	69%
	01.02.1998	27.02.1998	72%
13	04.07.1998	31.07.1998	80%
		31.08.1998	97%
		30.09.1998	98%
		31.10.1998	101%
		30.11.1998	102%
		31.12.1998	100%
		31.01.1999	94%
		28.02.1999	99%
		31.03.1999	98%
		30.04.1999	88%
	01.05.1999	01.05.1999	85%
14	23.05.1999	31.05.1999	85%
		30.06.1999	97%

Anhang B (Fortsetzung): Zusammengefasste Leistungshistorie KKB

Zyklus	Anfang	Ende	Leistungs- niveau	Zyklus	Anfang	Ende	Leistungs- niveau
		31.07.1999	98%			31.07.2004	100%
		31.08.1999	99%		01.08.2004	22.08.2004	92%
		30.09.1999	97%		26.10.2004	31.10.2004	58%
		31.10.1999	98%			30.11.2004	99%
		30.11.1999	97%			31.12.2004	99%
		31.12.1999	96%			31.01.2005	99%
		31.01.2000	98%			28.02.2005	100%
		29.02.2000	98%			31.03.2005	100%
		31.03.2000	91%			30.04.2005	99%
		30.04.2000	81%			31.05.2005	96%
	01.05.2000	06.05.2000	72%			30.06.2005	87%
15	28.05.2000	31.05.2000	72%		01.07.2005	02.07.2005	66%
		30.06.2000	95%	19	05.08.2005	31.08.2005	98%
		31.07.2000	92%			30.09.2005	98%
		31.08.2000	88%			31.10.2005	99%
		30.09.2000	88%			30.11.2005	100%
		31.10.2000	87%			31.12.2005	101%
		30.11.2000	91%			31.01.2006	101%
		31.12.2000	92%			28.02.2006	101%
		31.01.2001	94%			31.03.2006	101%
		28.02.2001	95%		01.04.2006	21.04.2006	103%
		31.03.2001	97%	20	27.05.2006	31.05.2006	93%
		30.04.2001	89%			30.06.2006	98%
		31.05.2001	81%			31.07.2006	86%
		30.06.2001	72%			31.08.2006	94%
16	25.07.2001	31.07.2001	98%			30.09.2006	98%
		31.08.2001	99%			31.10.2006	97%
		30.09.2001	102%			30.11.2006	99%
		31.10.2001	99%			31.12.2006	98%
		30.11.2001	101%			31.01.2007	95%
		31.12.2001	96%			28.02.2007	101%
		31.01.2002	96%			31.03.2007	100%
	01.02.2002	17.02.2002	99%		01.04.2007	10.04.2007	96%
17	27.03.2003	31.03.2003	69%	21	03.06.2007	04.06.2007	94%
		30.04.2003	91%		07.06.2007	27.06.2007	94%
		31.05.2003	100%		01.07.2007	17.07.2007	96%
		30.06.2003	99%				
		31.07.2003	97%				
		31.08.2003	93%				
		30.09.2003	99%				
		31.10.2003	98%				
		30.11.2003	98%				
		31.12.2003	96%				
		31.01.2004	98%				
		29.02.2004	98%				
18	03.04.2004	30.04.2004	91%				
		31.05.2004	98%				
		30.06.2004	97%				

Anhang C: Chemische Zusammensetzung der Bauteile (Auszug); Angaben in Gew.-%

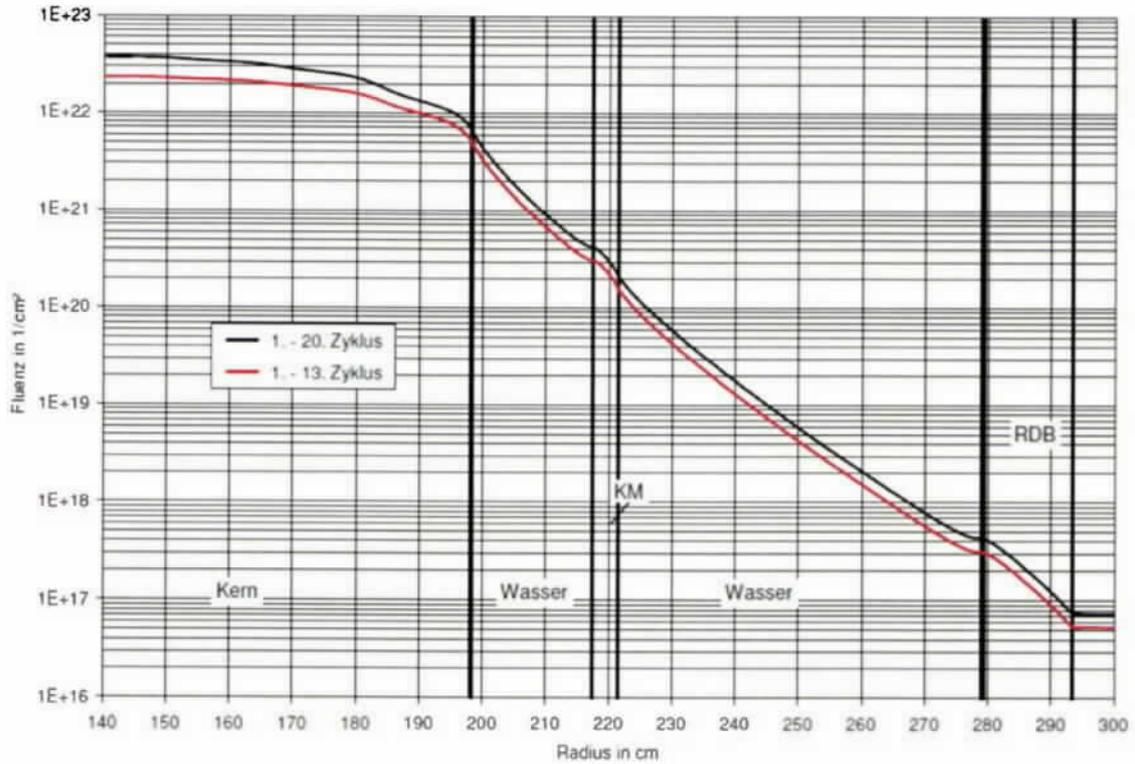
Bauteil/Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Co	Mo	N	Cu	Fe	H	Eu	Li
<b>RDB-Einbauten</b>														
KM, Schuss Typ 1	0,041	0,380	1,570	17,630	10,400	0,620	0,059				69,271			
KM, Schuss Typ 2	0,051	0,450	1,600	18,230	10,350	0,810	0,043				68,437			
KM, Schuss Typ 3	0,050	0,540	1,670	17,630	10,850	0,610	0,073				68,541			
KM, Schuss Typ 4	0,056	0,540	1,670	18,020	10,850	0,610	0,085				68,137			
KM, Schuss Typ 5	0,051	0,450	1,730	18,300	11,110	0,810	0,063				67,453			
KM, oberer Flansch	0,070	0,480	1,200	17,850	9,910	0,800	0,047				69,601			
KM, unterer Flansch	0,060	0,490	1,150	18,060	10,000	0,770	0,220				69,208			
Oberes Kerngitter	0,049	0,450	1,607	17,795	10,432	0,657	0,057				68,922			
Unteres Kerngitter	0,048	0,466	1,600	17,607	10,420	0,645	0,055				69,129			
Steuerstabführungsrohre	0,053	0,622	1,316	17,536	9,314	0,622	0,140				70,368			
Kerndeckel, Ring	0,027	0,520	1,290	18,600	9,600	0,460	0,019				69,465			
Kerndeckel	0,037	0,600	1,470	18,800	9,950	0,540	0,019				68,560			
Axialzyklone	0,062	0,577	1,626	17,665	10,128		0,263				69,124			
<b>RDB-Grundwerkstoff</b>														
Bodenkalotte	0,221	0,264	0,544	0,395	0,978		0,026	0,626		0,142	96,788			
Bodensegmentring	0,203	0,261	0,723	0,383	0,904		0,022	0,611		0,138	96,741			
Bodenverstärkungsring	0,200	0,263	0,697	0,377	0,720		0,013	0,637	0,010	0,063	96,925			
Schuss 4	0,162	0,296	0,753	0,406	0,812		0,027	0,635		0,142	96,729			
Schuss 5	0,202	0,224	0,714	0,404	0,798		0,026	0,655		0,156	96,777			
Schuss 6	0,204	0,272	0,712	0,397	0,772		0,027	0,644		0,134	96,796			
Schuss 7	0,190	0,276	0,733	0,389	0,803		0,026	0,644		0,119	96,781			
Schuss 8	0,206	0,269	0,741	0,399	0,794		0,026	0,655		0,136	96,736			
Schuss 9	0,199	0,263	0,718	0,375	0,798		0,025	0,653		0,137	96,794			
Behälterflansch	0,217	0,303	0,643	0,427	0,807		0,013	0,607	0,017	0,140	96,768			
Deckelflansch	0,213	0,297	0,657	0,357	0,700		0,013	0,603	0,010	0,100	96,995			
Deckelsegmentring	0,199	0,244	0,745	0,408	0,809		0,025	0,644		0,122	96,764			
Deckelkalotte	0,203	0,260	0,732	0,395	0,810		0,020	0,628		0,122	96,782			

Anhang C (Fortsetzung): Chemische Zusammensetzung der Bauteile (Auszug); Angaben in Gew.-%

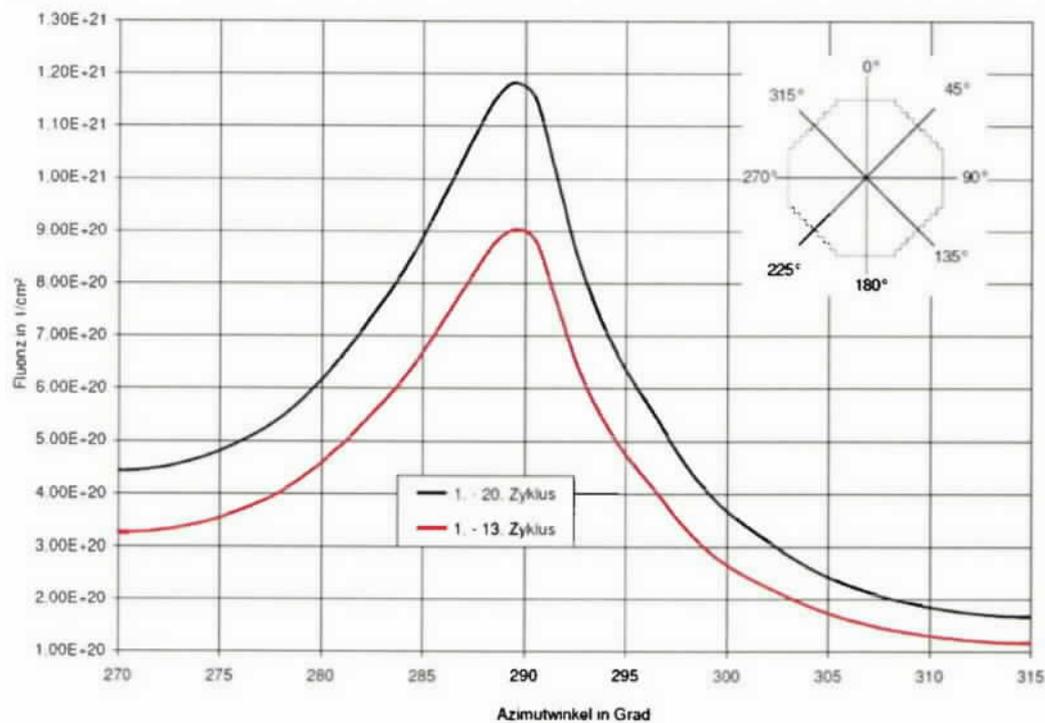
Bauteil\Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Co	Mo	N	Cu	Fe	H	Eu	Li
<b>Plattierung</b>														
Bodenkalotte	0,027	0,839	0,648	19,200	10,359	0,267	0,028	0,044	0,010		68,316			
Bodensegmentring	0,026	0,766	0,656	19,140	10,294	0,267	0,033	0,050	0,010		68,495			
Bodenverstärkungsring	0,026	0,820	0,678	19,145	10,453	0,267	0,033	0,050	0,010		68,253			
Schuss 4	0,035	0,620	1,040	20,637	10,909	0,267	0,048	0,000	0,039		66,374			
Schuss 5	0,041	0,647	0,993	19,922	10,747	0,267	0,049	0,000	0,039		67,261			
Schuss 6	0,043	0,393	0,823	19,726	10,868	0,267	0,048	0,000	0,039		67,757			
Schuss 7	0,034	0,653	1,011	20,007	10,710	0,267	0,037	0,000	0,039		67,208			
Schuss 8	0,041	0,573	1,027	20,145	10,623	0,267	0,032	0,000	0,039		67,222			
Schuss 9	0,036	0,690	0,958	20,298	10,672	0,267	0,030	0,000	0,039		66,974			
Behälterflansch	0,038	0,468	0,854	20,242	10,690	0,267	0,045	0,000	0,039		67,321			
Deckelflansch	0,031	0,837	0,756	19,714	10,781	0,267	0,041	0,057	0,010		67,245			
Deckelsegmentring	0,031	0,837	0,756	19,714	10,781	0,267	0,041	0,057	0,010		67,245			
Deckelkalotte	0,031	0,837	0,756	19,714	10,781	0,267	0,041	0,057	0,010		67,245			
<b>Stahlschlüssel 1.4550<sup>7</sup></b>														
Dampftrockner	0,040	0,500	1,000	18,000	10,500	0,700	0,020				69,210			
Steuerstabantriebs- gehäuserohre	0,040	0,500	1,000	18,000	10,500	0,700	0,020				69,210			
Steuerstabführungs- rohre	0,040	0,500	1,000	18,000	10,500	0,700	0,020				69,210			
<b>DIN-Beton</b>														
Normalbeton		18,779					0,00038				1,878	0,473	3,8E-05	0,00047
<b>Stahlschlüssel 1.0037<sup>7</sup></b>														
Bewehrung	0,085	0,150	0,700				0,020		0,005		98,996			

<sup>7</sup> Die Stahlschlüssel wurden um 200 ppm Co als Fe-Begleiter ergänzt

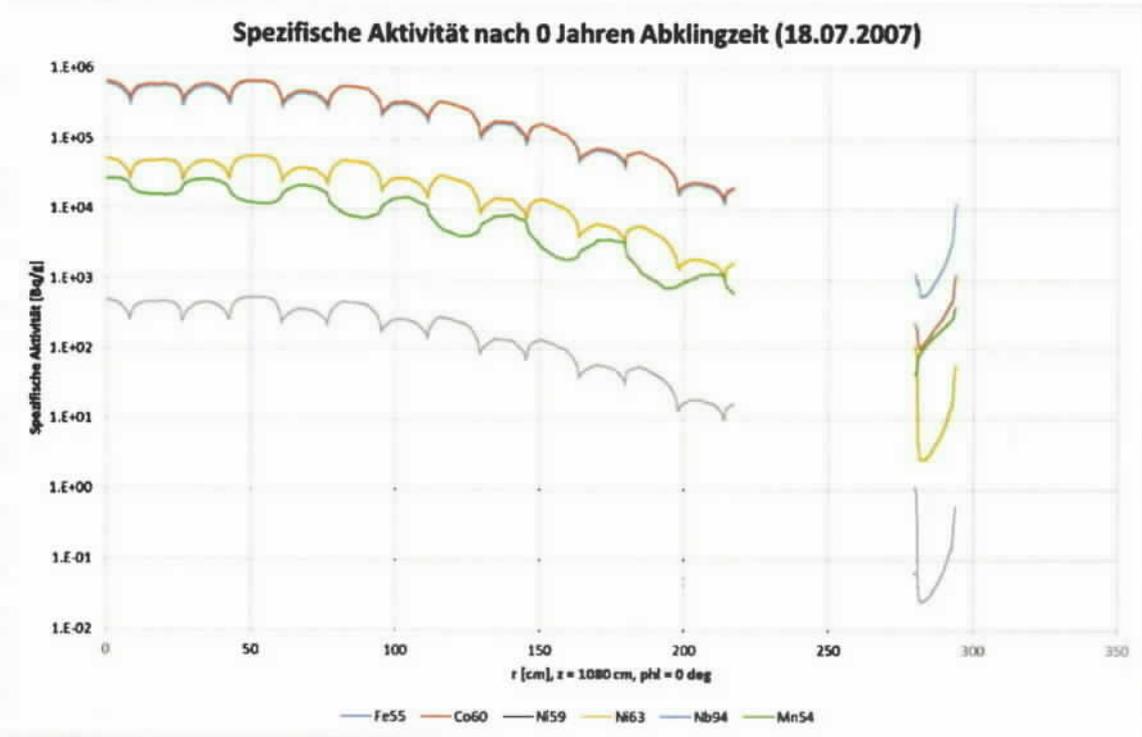
Anhang D: Radialer Verlauf der Fluenz im axialen Fluenzmaximum berechnet mit DORT nach /8/



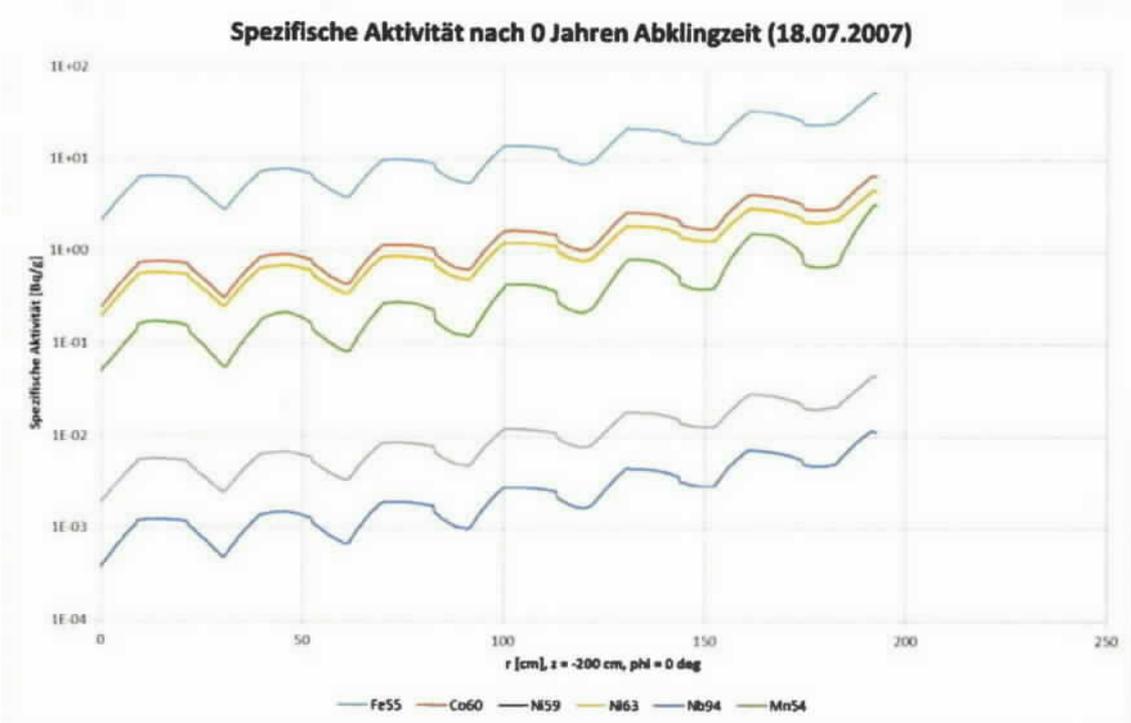
Anhang E: Azimutaler Verlauf der Fluenz im axialen Fluenzmaximum berechnet mit DORT nach /8/



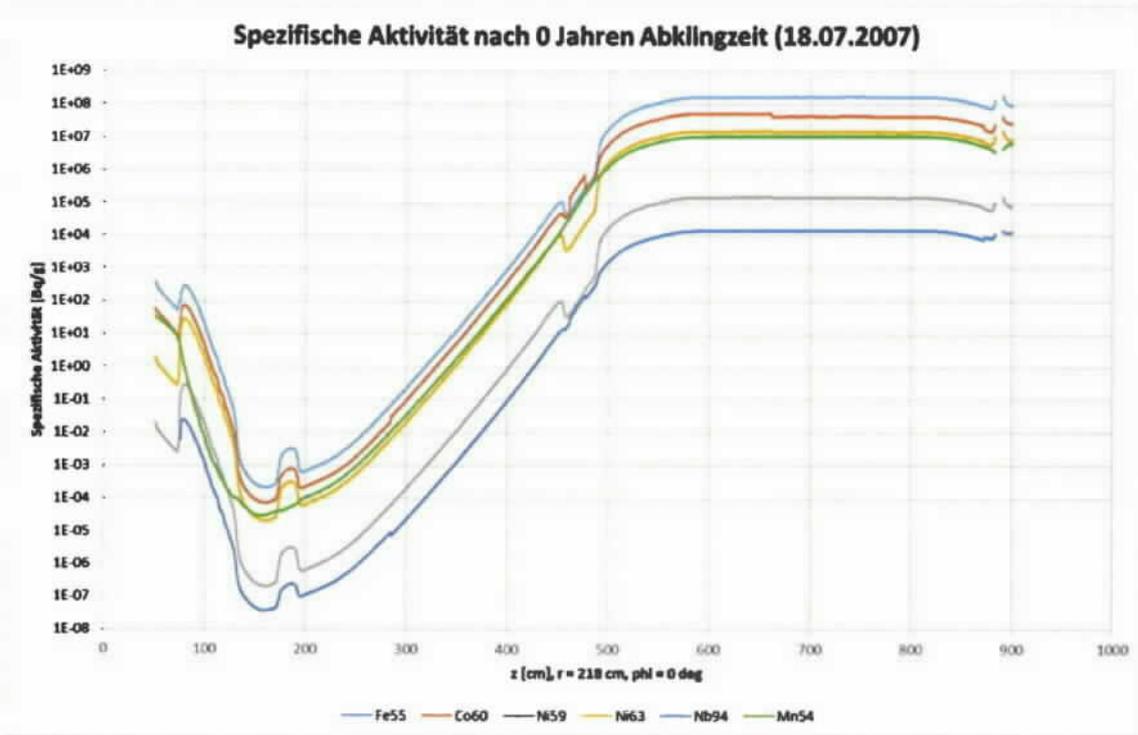
Anhang F: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich der Zykclone



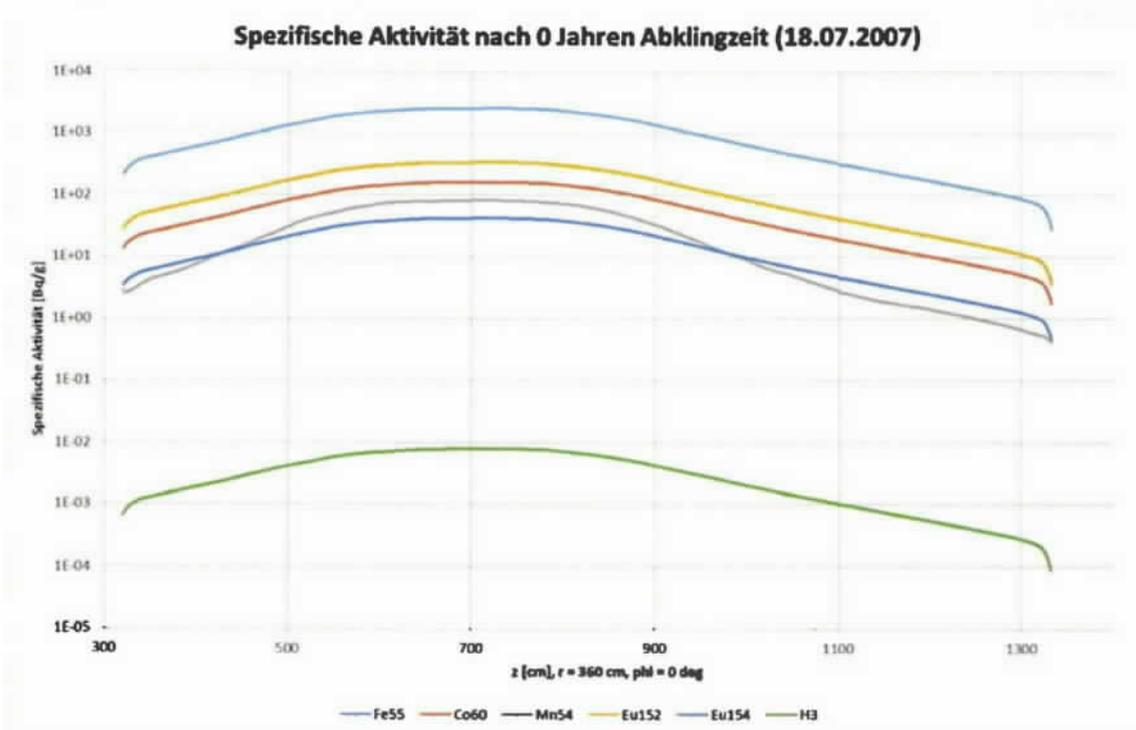
Anhang G: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich der Steuerstabantriebsgehäuserohre



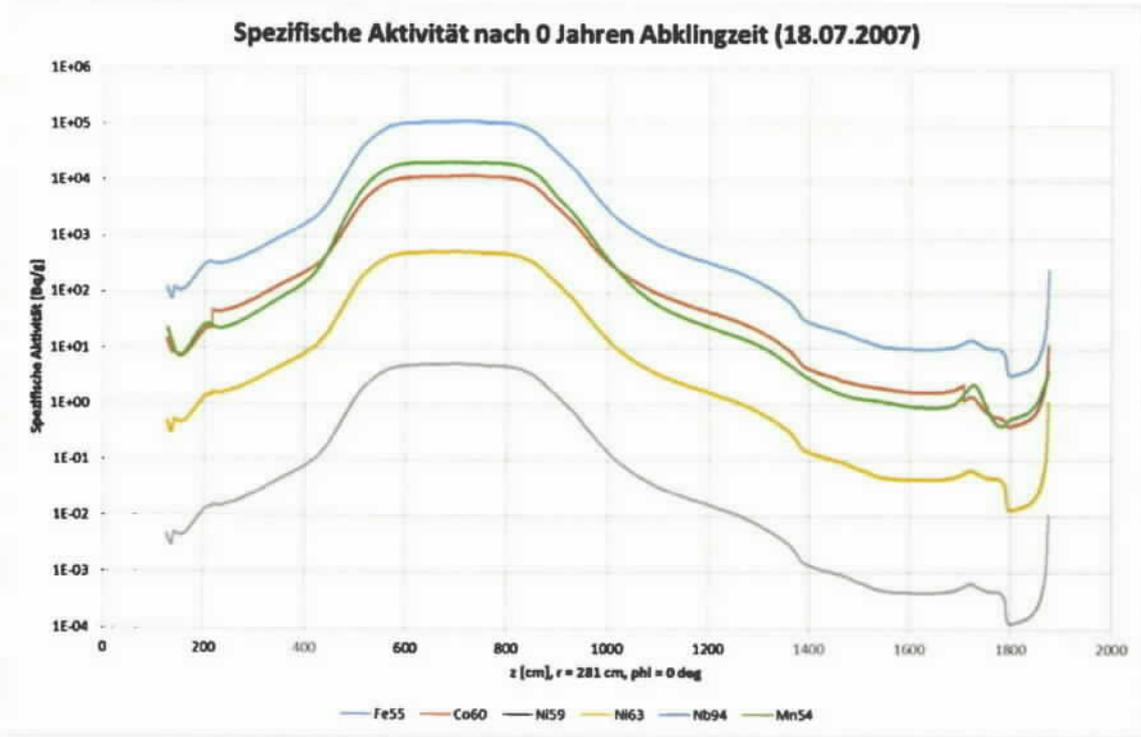
Anhang H: Axialer Verlauf der spezifischen Aktivität im Bereich des Kermantels



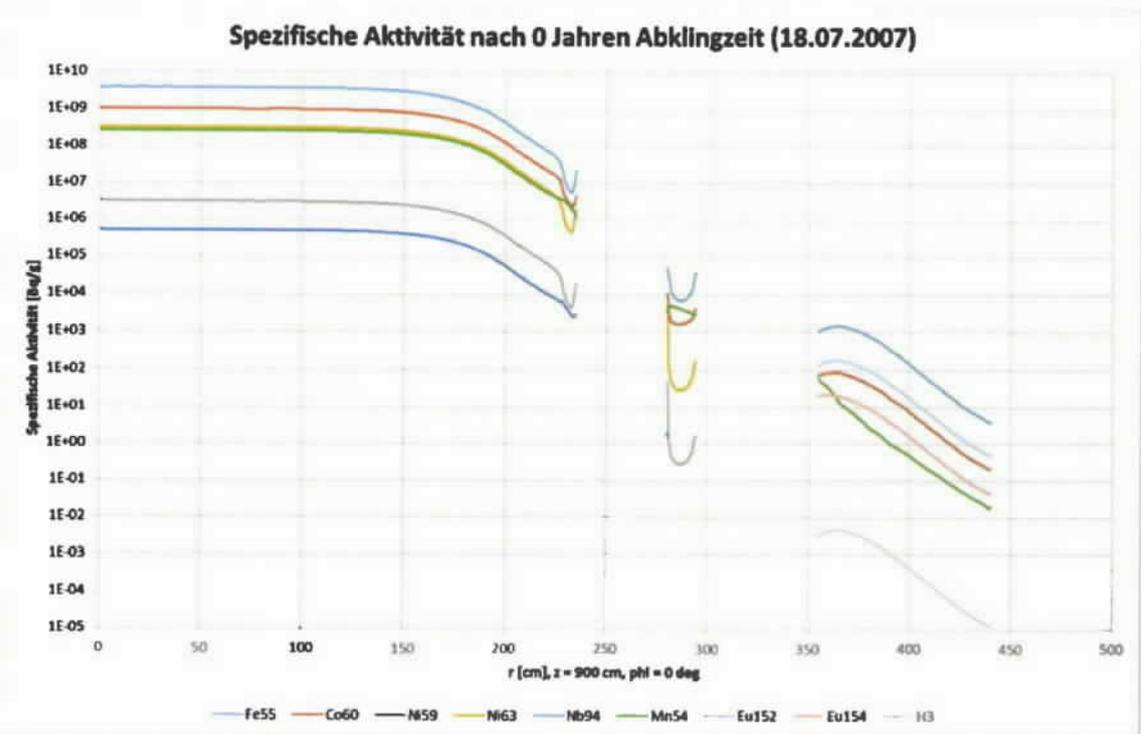
Anhang I: Axialer Verlauf der spezifischen Aktivität auf der Innenseite des Bioschilds



Anhang J: Axialer Verlauf der spezifischen Aktivität auf der Innenseite des RDB



Anhang K: Radialer Verlauf der spezifischen Aktivität durch das OKG, den RDB und den Bioschild

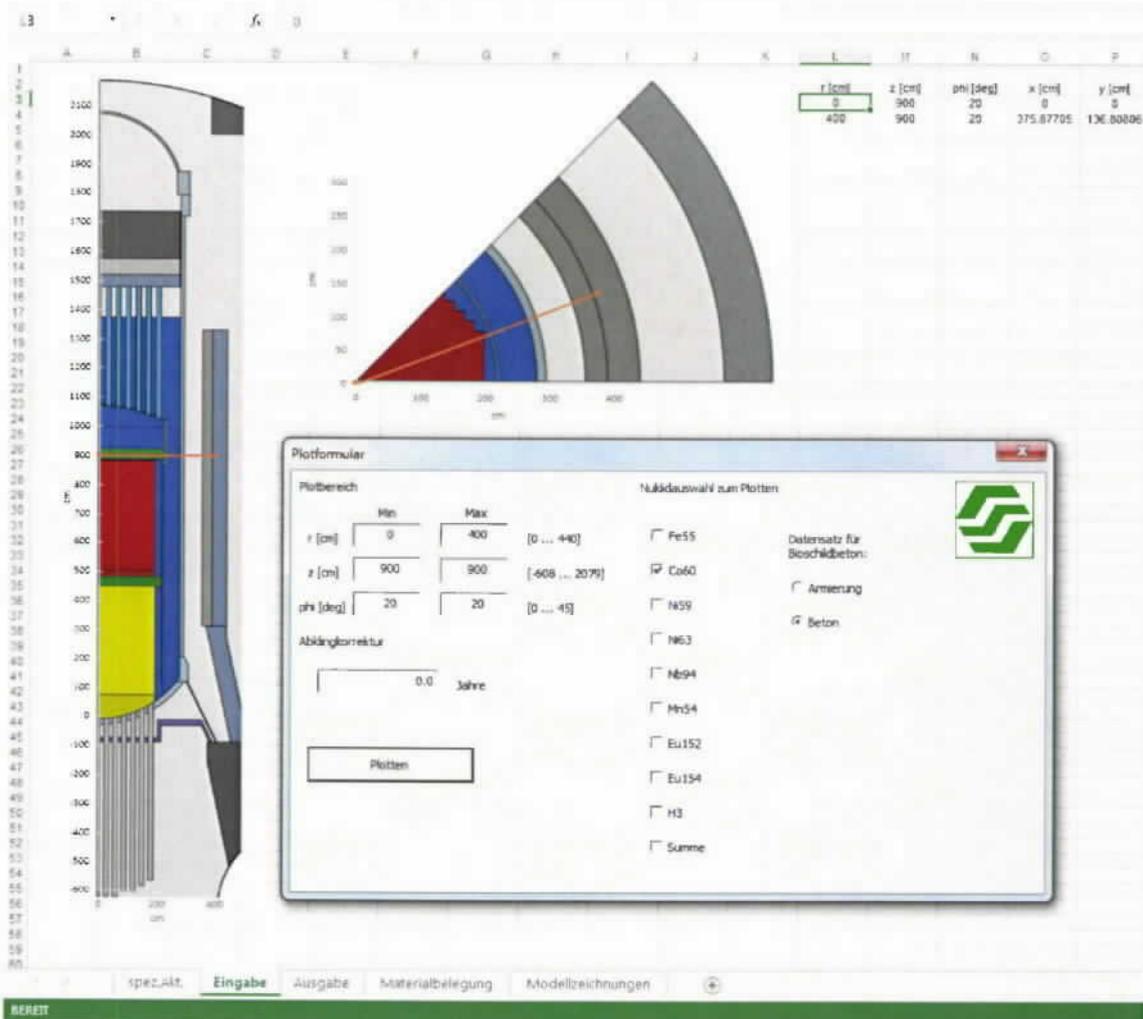


## Anhang L: Anwendungshinweise für das Excel-Makro zur Auswertung der spezifischen Aktivitäten im KKB

### Bedienung des Makros

Das Excel-Makro dient der Ausgabe von spezifischen Aktivitäten entlang vom Benutzer gewählter Schnittlinien durch den Reaktor KKB. Geometrisch werden dabei der RDB, die RDB-Einbauten und der Bioschild erfasst.

Der Reiter „Eingabe“ zeigt die Eingabemaske und zwei Schnitte durch das KKB-Modell.



Der Anwender gibt in den Koordinatenfeldern ein, entlang welcher Variablen und in welchem Bereich Daten ausgegeben werden sollen. Zulässig sind Plots entlang r, z oder phi. Durch Angabe einer Abklingzeit wird für die einzelnen Nuklide eine Abklingkorrektur durchgeführt. Über die Auswahlkästchen kann gewählt werden, für welche Nuklide die spezifische Aktivität geplottet werden soll. Für den Bioschild muss dabei ausgewählt werden, ob die spezifischen Aktivitäten für den Beton oder für die Armierung angefordert werden. Nach der Datenverarbeitung erscheint der Reiter „spez.Akt.“ mit den angeforderten Kurven.

Ferner wird im Reiter „Eingabe“ in die beiden Schnitte durch das KKB-Modell eingezeichnet, für welchen Bereich die Daten angefordert wurden (siehe Abbildung oben).

Im Reiter „Ausgabe“ werden die spezifischen Aktivitäten für alle Nuklide ausgegeben, unabhängig von der Nuklidauswahl für den Plot. Neben den spezifischen Aktivitäten ist die Nuklidzusammensetzung des für den entsprechenden Punkt zugrunde liegenden Materials angegeben. Somit ist erkennbar, ob sich Bereiche bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Änderungen in der Materialzusammensetzung können sich durch Sprünge im Aktivitätsverlauf bemerkbar machen.

Der Reiter „Materialzusammensetzung“ dient der Information, welche Geometrieannahmen und welcher Bereich mit welcher chemischen Zusammensetzung hinterlegt sind. Eine Änderung dieser Zusammensetzung ist nicht möglich. Soll eine Gehaltsänderung eines Elements simuliert werden, können die Makroergebnisse in erster Näherung linear skaliert werden.

Der Reiter „Modellzeichnungen“ enthält alle Maße des Modells.

### **Hinweise zur Performance des Makros**

Die Excel-Datei ist sehr groß (ca. 370 MB), da die Daten in hoher Auflösung hinterlegt sind und die Datenmenge damit sehr groß ist. Daher kann das Öffnen der Datei etwas Zeit in Anspruch nehmen. Die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung hängt davon ab, wie viele Daten angefordert werden. Am längsten dauern Plots entlang der gesamten z-Achse, da in diesem Fall die meisten Daten verarbeitet werden müssen.

Das Makro wurde mit Excel 2013 und 2010 getestet. Excel 2007 wurde nicht getestet. Daher kann Abwärtskompatibilität zu Excel 2007 nicht gewährleistet werden. Excel 2003 kann die Menge an Daten nicht verarbeiten und ist damit ungeeignet.