

**Nachrechnung  
radiochemischer  
Analyseproben mit dem  
Abbrandprogramm  
MOTIVE**

**Nachrechnung  
radiochemischer  
Analyseproben mit dem  
Abbrandprogramm  
MOTIVE**

Matthias Behler  
Volker Hannstein  
Fabian Sommer

September 2018

**Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Kennzeichen RS1542 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt. 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**

Abbrand, MOTIVE, Nuklidinventar, Radiochemische Analyseproben, Validierung

## **Kurzfassung**

Zur Validierung des in der GRS entwickelten Abbrandprogramms MOTIVE hinsichtlich der Nuklidinventarberechnung wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens RS1542 umfangreiche Nachrechnungen von radiochemischen Analyseproben bestrahlter Brennelemente aus kommerziellen Druck- und Siedewasserreaktoren durchgeführt. Hierzu wurden öffentlich verfügbare experimentelle Daten aus der Datenbank SFCOMPO 2.0 der OECD/NEA herangezogen. Der vorliegende Bericht dient der Dokumentation dieser Arbeiten. Dazu werden die verwendeten Probenserien umfassend beschrieben und die für die Rechenmodelle verwendeten Eingangsdaten und Annahmen wiedergegeben. Die berechneten Nuklidinventare werden jeweils mit den gemessenen Inventaren verglichen und die auftretenden Abweichungen untersucht und eingeordnet. Die Gesamtheit der Resultate wird zusammenfassend analysiert und durch Vergleich mit entsprechenden Daten aus eigenen Validierungsrechnungen mit dem Vorgängerprogramm KENOREST sowie aus vom Oak Ridge National Laboratory durchgeführten Analysen mit dem Programmpaket SCALE eingeordnet und bewertet.

## **Abstract**

For the validation of the nuclide inventory determination of the burn-up code MOTIVE, which is currently under development in GRS, extensive calculations of radiochemical assay data from spent nuclear fuel of commercial pressurized water reactors and boiling water reactors have been performed in the framework of the reactor safety research projects RS1542 „Further Development of Modern Methods in the Field of Burn-Up Calculation“. A set of publicly available experimental data taken from the SFCOMPO 2.0 data base of OECD/NEA was chosen for this purpose. The present report documents these efforts. The different series of samples chosen for the validation calculations are described in detail and the parameters used for the calculational models as well as the assumptions made in the modelling process are documented. The calculated nuclide inventories are compared to the measured data and the deviations between these are analysed and assessed. The overall results are collected, analysed and compared to corresponding data from own validation calculations with the predecessor code KENOREST and from calculations performed by Oak Ridge National Laboratory with the code package SCALE.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung.....</b>	<b>I</b>
	<b>Abstract.....</b>	<b>II</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Struktur und Vorgehensweise .....	2
<b>2</b>	<b>Nachrechnung von DWR-Proben.....</b>	<b>5</b>
2.1	Proben der Reaktoren Ohi-1 und Ohi-2 .....	5
2.1.1	Experimentelle Daten .....	5
2.1.2	Modellierung .....	16
2.1.3	Resultate .....	18
2.2	Proben des Reaktors Takahama-3 .....	26
2.2.1	Experimentelle Daten .....	26
2.2.2	Modellierung .....	41
2.2.3	Resultate .....	42
2.3	Proben des Reaktors Three Mile Island-1 .....	52
2.3.1	Experimentelle Daten .....	52
2.3.2	Modellierung .....	71
2.3.3	Resultate .....	72
2.4	Proben des Reaktors Gösgen aus dem ARIANE-Programms.....	82
2.4.1	Experimentelle Daten .....	85
2.4.2	Modellierung .....	103
2.4.3	Resultate .....	115
2.5	Proben des Reaktors Beznau-I aus dem ARIANE-Programms.....	120
2.5.1	Experimentelle Daten .....	121
2.5.2	Modellierung .....	141
2.5.3	Resultate .....	154
2.6	Probe des Gemeinschaftskraftwerks Neckarwestheim II (GKN-II) aus dem REBUS-Programm.....	158

2.6.1	Experimentelle Daten .....	159
2.6.2	Modellierung .....	173
2.6.3	Resultate .....	183
2.7	Proben des Reaktors Calvert Cliffs-1 .....	186
2.7.1	Experimentelle Daten .....	186
2.7.2	Modellierung .....	201
2.7.3	Resultate .....	202
<b>3</b>	<b>Nachrechnungen von SWR-Proben.....</b>	<b>209</b>
3.1	Proben des Reaktors Fukushima-Daini-2 .....	209
3.1.1	Experimentelle Daten .....	209
3.1.2	Modellierung .....	222
3.1.3	Resultate .....	223
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung der Nachrechnungen.....</b>	<b>231</b>
4.1	DWR.....	231
4.1.1	Vergleich mit KENOREST .....	236
4.1.2	Vergleich mit SCALE .....	236
4.2	SWR.....	242
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>247</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>249</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>255</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>259</b>

# 1 Einleitung

Zur Validierung der Ergebnisse eines Simulationsprogramms sind, soweit möglich, Vergleiche mit experimentellen Daten erforderlich. Für den vorliegenden Fall Abbrandprogramms MOTIVE sind die primären Ergebnisdaten die Nuklidinventare des bestrahlten Brennstoffs. Zur Überprüfung dieser Ergebnisdaten können radiochemischen Analysen von Proben bestrahlter Brennelemente aus kommerziellen Leichtwasserreaktoren herangezogen werden. Mit der Datenbank SFCOMPO 2.0 der OECD/NEA /MIC 17/ steht eine umfangreiche Sammlung frei verfügbarer Proben zur Verfügung. Sie stellt neben den jeweiligen experimentellen Ergebnissen eine aufbereitete Darstellung der für eine Nachrechnung notwendigen Eingabedaten zur Verfügung und bietet über Verknüpfungen Zugang zur zugehörigen Originalliteratur an.

Die SFCOMPO 2.0 diene als Grundlage für umfangreiche Probennachrechnungen, die im vorliegenden Rechenbericht detailliert dargestellt werden. Das Ziel der Nachrechnungen war die Bereitstellung einer Datenbasis für die Validierung des Programms MOTIVE. Die Auswahl der nachgerechneten Proben erfolgte dabei in Hinblick auf die Vollständigkeit der für die Simulation notwendigen Eingangsparameter und die Anzahl der gemessenen Nuklide. In Tab. 1.1 ist die Liste der nachgerechneten Proben dargestellt. Diese umfassen sowohl Druckwasserreaktor-(DWR)-Brennelemente als auch Siedewasserreaktor-(SWR)-Brennelemente. Die Anfangsanreicherung umfasst dabei Werte von 1,69 bis 4,66 Gew. %  $^{235}\text{U}$ . Der Abbrand der nachgerechneten Proben reicht von 7,2 bis 55,7 GWd/tSM. Während die Mehrzahl der Proben von  $\text{UO}_2$ -Brennstoff stammt, sind auch zwei Proben MOX-Brennstoff unter den nachgerechneten Proben. Insgesamt umfasst die Datenbasis 74 Proben aus 21 Brennstäben, die wiederum aus neun Reaktoren stammen.

**Tab. 1.1** Liste der im Rahmen des Berichts untersuchten Nachbestrahlungsanalyseproben

	Typ	Brennstoff	Anreicherung [wt%]	Anzahl Stäbe	Anzahl Proben	Abbrand [GWd/tHM]
Beznau – 1	PWR	MOX	5,5 (Pu)	1	2	39,6 – 58,9
Calvert Cliffs - 1	PWR	UO <sub>2</sub>	2,45, 2,72, 3,04	3	9	18,7 – 46,5
Fukushima Daini - 2	BWR	UO <sub>2</sub>	3,4, 3,91	2	15	7,2 – 44,0
Gösgen	PWR	UO <sub>2</sub>	3,5, 4,1	2	3	21,8 – 38,9
GKN - 2	PWR	UO <sub>2</sub>	3,8	1	1	54,0
Ohi - 1	PWR	UO <sub>2</sub>	3,2	1	1	52,4
Ohi - 2	PWR	UO <sub>2</sub>	1,69, 3,2	3	5	21,5 – 38,5
Takahama - 3	PWR	UO <sub>2</sub>	2,63, 4,11	3	14	14,3 – 47,3
Three Mile Island - 1	PWR	UO <sub>2</sub>	4,01, 4,66	5	24	22,8 – 55,7
			Summe	21	74	

Bei den hier vorgestellten Nachrechnungen handelt es sich um eine generische Analyse ohne direkten Bezug auf einen konkreten Anwendungsfall, die der allgemeinen Validierung von MOTIVE dient. Die dargestellten Ergebnisse können in einem zusätzlichen Schritt zum Beispiel für eine Anwendung im Bereich Abbrandkredit auf ein konkretes Problem übertragen werden. Die grundlegende Vorgehensweise für eine solche Analyse ist zum Beispiel in /BEH 14/ dargestellt.

## 1.1 Struktur und Vorgehensweise

Im Folgenden sind zunächst alle Nachrechnungen sortiert nach Reaktoren dargestellt. Dabei werden jeweils zunächst die experimentellen Daten beschrieben. Im Anschluss daran wird die Modellierung im Rahmen von MOTIVE dargestellt. Schließlich folgt eine Darstellung und Diskussion der Nachrechnungsergebnisse. Nach der Darstellung aller nachgerechneten Proben erfolgt eine zusammenfassende Auswertung aller Nachrechnungsergebnisse getrennt für DWR und SWR Proben. Die Ergebnisse werden mit vergleichbaren Daten anderer Programme verglichen.

Eine Darstellung der für alle Nachrechnungen gewählten Modellparameter und Annahmen erfolgt im Rahmen der Darstellungen für die Proben aus den Reaktoren Ohi-1 und Ohi-2.



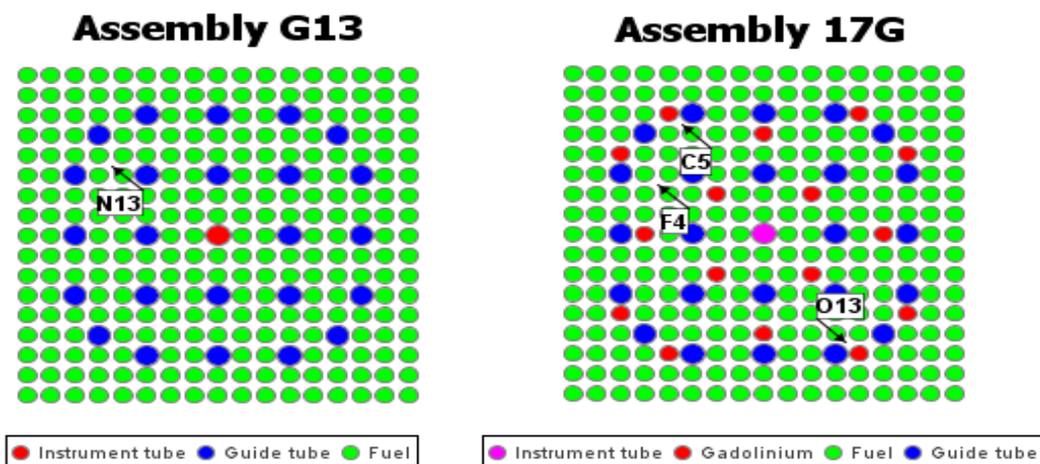
## 2 Nachrechnung von DWR-Proben

### 2.1 Proben der Reaktoren Ohi-1 und Ohi-2

Aus den zwei Druckwasserreaktoren Ohi-1 und Ohi-2, die von der japanischen Kansai Electric Power Co., Inc. betrieben werden, gibt es insgesamt 6 Nachbestrahlungsanalyseproben. Aus dem Reaktorblock Ohi-1 (1100 MWe) stammt eine Probe aus dem Brennelement G13, das über vier Zyklen einen Gesamtabbrand von 45 GWd/tSM erfahren hat. Die restlichen fünf Proben aus dem Reaktorblock Ohi-2 entstammen dem Brennelement 17G, das über zwei Zyklen mit einem Gesamtabbrand von 31,5 GWd/tSM eingesetzt wurde. Die Angaben zu Brennelementgeometrien, Materialdaten und Abbrandhistorien stammen vorwiegend aus der Datenbank SFCOMPO /MIC 17/ und wurden teilweise aus der Veröffentlichung /SUY 11/ ergänzt.

#### 2.1.1 Experimentelle Daten

Bei beiden Brennelementen handelt es sich um 17 x 17 DWR Brennelemente mit jeweils einem zentralen Instrumentierungsrohr und 24 Steuerstabführungsrohren. Das Brennelement 17G enthält zusätzlich 16 Brennstäbe mit dem abbrennbaren Neutronenabsorber  $Gd_2O_3$ . In Abb. 2.1 ist die schematische Darstellung der zwei Brennelemente mit den unterschiedlichen Brennstäben farblich kodiert dargestellt /MIC 17/.



**Abb. 2.1** Schematische Darstellung der Brennelemente G13 und 17G aus Ohi-1 und Ohi-2 (aus SFCOMPO 2.0)

In Tab. 2.1 sind die relevanten gemeinsamen geometrischen Abmessungen der beiden Brennelemente wiedergegeben, in Tab. 2.2 die relevanten gemeinsamen geometri-

schen Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre /MIC 17/, /SUY 11/, die für beide Brennelemente identisch sind.

**Tab. 2.1** Geometrische Abmessungen der Brennelemente G13 und 17G

Parameter	
Gittertyp	17 x 17
Brennstababstand [cm]	1,26
Brennelementabstand [cm]	21,504
Brennstablänge [cm]	385,2
Aktive Brennstablänge [cm]	381,6
Anzahl Brennelemente	264
Anzahl Führungsrohre	24
Anzahl Instrumentalrohre	1

**Tab. 2.2** Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre

Parameter	
Durchmesser Brennstoff [cm]	0,805
Durchmesser Hüllrohr innen [cm]	0,822
Durchmesser Hüllrohr außen [cm]	0,95
Material Hüllrohr	Zircaloy-4
Dichte Hüllrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,56
Durchmesser Führungs- und Instrumentalrohre innen [cm]	1,125
Durchmesser Führungs- und Instrumentalrohre außen [cm]	1,205
Material Führungs- und Instrumentalrohre	Zircaloy-4
Dichte Führungs- und Instrumentalrohre [g/cm <sup>3</sup> ]	6,56

Aus dem Brennelement G13 wurde die Probe 91E07 aus dem Brennstab N13 entnommen, bei dem Brennelement 17G wurden die Proben 89G01 und 89G03 aus dem Brennstab C5, die Probe 89G05 aus dem Brennstab O13 und die Proben 89G08 und 89G10 aus dem Brennstab F4 entnommen. Weitere Details der 6 Proben finden sich in Tab. 2.3. Details zur Brennstoffzusammensetzung wurden aus /MIC 17/ entnommen. Die allgemeinen Werte sind in Tab. 2.4, die nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der UO<sub>2</sub> Brennstäben in Tab. 2.5, und die nuklidweise Brennstoffzusammensetzung

der  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  Brennstäbe in Tab. 2.6 wiedergegeben. Die angegebenen Gew-% wurden für die Rechnung unter Berücksichtigung der Dichte des Brennstoffs in Kernzahl-dichten umgerechnet. Die Isotopenzusammensetzung von Gadolinium wurde aus Referenz /SUY 11/ übernommen.

**Tab. 2.3** Relevante Details der 6 Proben aus Ohi-1 und Ohi-2

Parameter	91E07	89G01	89G03	89G05	89G08	89G10
Reaktorblock	Ohi-1	Ohi-2	Ohi-2	Ohi-2	Ohi-2	Ohi-2
Brennelement	G13	17G	17G	17G	17G	17G
Brennstab	N13	C5	C5	O13	F4	F4
Anzahl Bestrahlungszyklen	4	2	2	2	2	2
Probenabbrand [GWd/tSM]	52,434	21,465	28,717	25.137	30.172	38.496
Probenhöhe der aktiven Zone [cm]	112,8	26,7	73,7	73,3	26,5	73,8

**Tab. 2.4** Daten zur Materialzusammensetzung des Brennstoffs

Parameter	91E07	89G01	89G03	89G05	89G08	89G10
Brennstoff	$\text{UO}_2$	$\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$	$\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$	$\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$	$\text{UO}_2$	$\text{UO}_2$
$^{235}\text{U}$ Anreicherung [Gew%]	3,2	1,6874	1,6874	1,6874	3,2	3,2
Dichte Brennstoff [tD- $\text{UO}_2$ ]	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %
Dichte Brennstoff [ $\text{g/cm}^3$ ]	10,412	10,412	10,412	10,412	10,412	10,412
$\text{Gd}_2\text{O}_3$ Anteil [Gew%]	-	6,0	6,0	6,0	-	-

**Tab. 2.5** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der  $\text{UO}_2$  Brennstäbe

Isotop	[wt.-%]	Kernzahl-dichten
$^{234}\text{U}$	0,0281	6,6369E-06
$^{235}\text{U}$	3,2	7,5259E-04
$^{236}\text{U}$	0,002	4,6838E-07
$^{238}\text{U}$	96,7699	2,2472E-02
$^{16}\text{O}$		4.6463E-02

**Tab. 2.6** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der  $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$  Brennstäbe

Isotop	[wt.-%]	Kernzahldichten
$^{234}\text{U}$	0,0141	3,1305E-06
$^{235}\text{U}$	1,6874	3,7305E-04
$^{236}\text{U}$	0,0008	1,8735E-07
$^{238}\text{U}$	98,2977	2,1458E-02
$^{152}\text{Gd}$	0,19	4,0803E-06
$^{154}\text{Gd}$	2,13	4,5148E-05
$^{155}\text{Gd}$	14,58	3,0705E-04
$^{156}\text{Gd}$	20,3	4,2477E-04
$^{157}\text{Gd}$	15,62	3,2476E-04
$^{158}\text{Gd}$	24,95	5,1546E-04
$^{160}\text{Gd}$	22,23	4,5353E-04
$^{16}\text{O}$		4,6780E-02

Nach /MIC 17/ bestehen alle Strukturmaterialien aus Zirkaloy-4. Hierfür wurden die Kernzahldichten mit der in der Referenz angegebenen Dichte und der natürlichen Isotopen-Zusammensetzung (aus /MAG 18/) verwendet. Diese Werte sind in Tab. 2.7 wiedergegeben. /MIC 17/ gibt auch die Bestrahlungsgeschichte in Form von spezifischer Leistung der Proben und Bor-Konzentration an. Die verwendeten Werte für die Probe aus Ohi-1 sind in Tab. 2.8 wiedergegeben.

**Tab. 2.7** Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturmaterials Zirkaloy-4

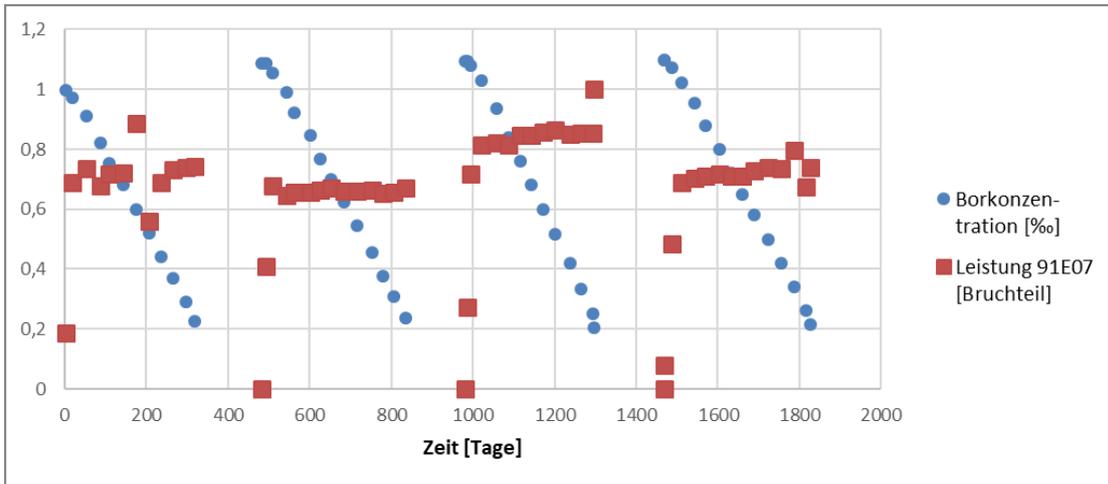
Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kern-zahl-dichten [1/barn*cm]	Element	[wt.-%]	Isotope	Kern-zahl-dichten [1/barn*cm]
Zr	98,23			Fe	0,21		
		<sup>90</sup> Zr	2,1778E-02			<sup>54</sup> Fe	8,8154E-06
		<sup>91</sup> Zr	4,6971E-03			<sup>56</sup> Fe	1,3344E-04
		<sup>92</sup> Zr	7,1016E-03			<sup>57</sup> Fe	3,0277E-06
		<sup>94</sup> Zr	7,0437E-03			<sup>58</sup> Fe	3,9598E-07
		<sup>96</sup> Zr	1,1111E-03	Cr	0,1		
Sn	1,45					<sup>50</sup> Cr	3,3702E-06
		<sup>112</sup> Sn	4,8703E-06	<sup>52</sup> Cr	6,2491E-05		
		<sup>114</sup> Sn	3,2557E-06	<sup>53</sup> Cr	6,9523E-06		
		<sup>115</sup> Sn	1,6626E-06	<sup>54</sup> Cr	1,6985E-06		
		<sup>116</sup> Sn	7,0487E-05	Hf	0,01		
		<sup>117</sup> Sn	3,6913E-05			<sup>174</sup> Hf	3,5662E-09
		<sup>118</sup> Sn	1,1542E-04			<sup>176</sup> Hf	1,1591E-07
		<sup>119</sup> Sn	4,0593E-05			<sup>177</sup> Hf	4,0754E-07
		<sup>120</sup> Sn	1,5268E-04			<sup>178</sup> Hf	5,9437E-07
		<sup>122</sup> Sn	2,1341E-05			<sup>179</sup> Hf	2,9509E-07
<sup>124</sup> Sn	2,6258E-05	<sup>180</sup> Hf	7,5582E-07				

**Tab. 2.8** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 4 bis 7 für die eine Probe aus Ohi-1

Zyklus	Zeit-schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]	Zyklus	Zeit-schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]
4	3	996,2	10,1335	5	11	1085,9	22,147
	15	973,6	37,0675		14	1054,0	36,5955
	35	910,7	39,7453		35	991,3	34,9268
	35	822,6	36,4924		19	922,3	35,3327
	21	752,2	38,6229		39	848,2	35,4302
	35	681,8	38,9389		24	767,6	35,8369
	30	600,0	47,7806		28	701,1	36,1223
	33	520,8	30,2358		32	624,4	35,5159
	30	441,5	37,1409		31	543,9	35,5534
	28	368,6	39,5653		37	457,0	35,7104
	33	291,8	39,7663		26	376,4	35,2838
	20	225,2	40,0571		28	307,4	35,4828
Revision	165	1085,9	0	Revision	28	235,8	36,146
6	3	1095,7	14,6156	7	2	1097,5	4,2872
	8	1080,0	38,6167		17	1073,6	26,0788
	27	1030,0	43,8392		23	1023,3	37,238
	39	935,7	44,2363		32	954,2	37,8623
	28	840,0	43,8972		28	878,8	38,3605
	28	760,0	45,7526		35	799,6	38,7654
	28	680,0	45,6433		28	720,4	38,3248
	28	600,0	46,282		28	650,0	38,3605
	31	515,7	46,6313		28	579,6	39,3152
	35	421,4	45,9499		35	500,4	39,7938
	27	332,9	45,965		30	418,7	39,7545
	29	252,9	46,1249		33	339,5	42,9906
	4	205,7	53,9459		28	262,8	36,2934
Revision	171	1097,5	0	11	213,8	39,9546	

Die zeitliche Entwicklung der Borkonzentration in ppm und der Leistung als Bruchteil der Maximalleistung (53,9459 MW/tSM) sind für die Probe 91E07 des Brennelements

G13 aus Ohi-1 in Abb. 2.2 graphisch dargestellt. Die verwendeten Werte für die fünf Proben aus Ohi-2 sind in Tab. 2.9 wiedergegeben.

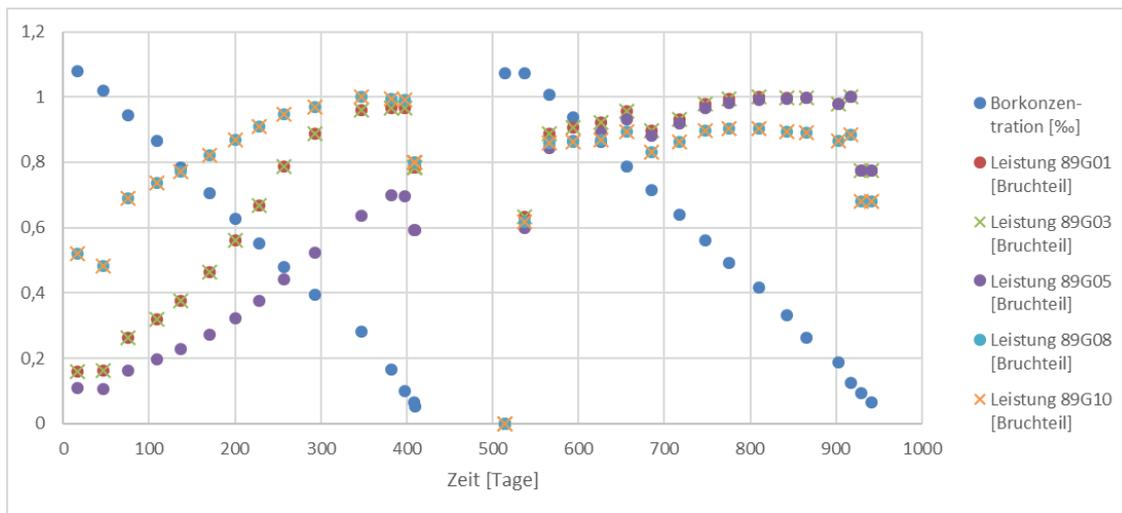


**Abb. 2.2** Bestrahlungsgeschichte der Probe 91E07 des Brennelements G13 aus Ohi-1

**Tab. 2.9** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 und 6 für die fünf Proben aus Ohi-2

Zyklus	Zeit-schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]				
			89G01	89G03	89G05	89G08	89G10
5	17	1078,2	5,2713	7,0522	4,9558	22,2135	28,3425
	29	1019,3	5,3752	7,1909	4,8717	20,5815	26,2609
	29	945,1	8,6538	11,5775	7,4757	29,3372	37,4308
	34	864,4	10,5425	14,1044	9,0156	31,314	39,9541
	28	785,0	12,4725	16,6859	10,4147	32,8118	41,8652
	33	706,9	15,3365	20,5177	12,4871	34,9817	44,6315
	30	626,2	18,5945	24,876	14,6983	37,0163	47,2293
	28	552,0	22,1015	29,5683	17,1644	38,7825	49,4832
	29	479,0	26,0241	34,8155	20,2423	40,3185	51,4433
	36	395,7	29,3654	39,2851	23,8536	41,2981	52,6923
	54	280,5	31,7315	42,4508	29,0331	42,5648	54,3095
	35	166,5	31,9805	42,7829	31,9448	42,3346	54,0156
	16	101,2	31,9178	42,7008	31,8608	42,2386	53,8932
	11	66,6	25,8998	34,6494	27,073	33,9834	43,3591
	1	51,3	25,8998	34,6494	27,073	33,9834	43,3591
Revision	104	1071,7	0	0	0		
6	23	1071,7	20,8979	27,9577	27,3535	26,322	33,5851
	29	1007,8	29,386	39,3134	38,5528	36,5559	46,6416
	28	937,7	29,9261	40,0353	39,4762	36,7283	46,862
	32	863,9	30,5073	40,8128	40,6526	36,9977	47,2048
	30	787,7	31,6688	42,3678	42,6116	38,0723	48,5772
	29	715,2	29,635	39,6465	40,2041	35,3657	45,1232
	32	640,2	30,8386	41,2572	41,9961	36,6519	46,764
	31	562,7	32,3539	43,2839	44,1798	38,1497	48,6751
	27	491,4	32,8313	43,9218	44,9078	38,4945	49,1159
	35	415,2	33,0596	44,2275	45,2996	38,4181	49,018
	33	331,6	32,9763	44,1161	45,3562	37,9959	48,4792
	23	262,7	33,0185	44,1718	45,5517	37,8617	48,3078
	37	188,9	32,3333	43,2556	44,684	36,8057	46,9599
	14	126,2	33,0596	44,2275	45,6816	37,6119	47,9894
	12	94,3	25,6506	34,3154	35,4447	28,9336	36,9165
12	64,8	25,6506	34,3154	35,4447	28,9336	36,9165	

Die zeitliche Entwicklung der Borkonzentration [%o] und der Leistung als Bruchteil der Maximalleistung sind für die Proben 89G01 ( $P_{\max} = 33,0596 \text{ MW/tSM}$ ), 89G03 ( $P_{\max} = 44,2275 \text{ MW/tSM}$ ), 89G05 ( $P_{\max} = 45,6816 \text{ MW/tSM}$ ), 89G08 ( $P_{\max} = 42,5648 \text{ MW/tSM}$ ), und 89G10 ( $P_{\max} = 54,3095 \text{ MW/tSM}$ ) des Brennelements 17G aus Ohi-2 in Abb. 2.3 graphisch dargestellt.



**Abb. 2.3** Bestrahlungsgeschichte der Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 des Brennelements 17G aus Ohi-2

Da die Proben 89G03 und 89G05, bzw. 89G08 und 89G10 jeweils aus demselben Brennstab stammen, sind ihre relativen Leistungskurven identisch. Aufgrund der unterschiedlichen Axialposition der Proben sind die jeweiligen absoluten Leistungswerte dennoch unterschiedlich. Beim Vergleich der relativen Leistungsgeschichten der Proben zeigt sich der Einfluss der gadoliniumhaltigen Brennstäbe: Der Neutronenabsorber Gadolinium wird innerhalb des ersten Zyklus weitgehend ausgebrannt. Aus diesem Grund kommt es zu einer starken Leistungszunahme innerhalb des ersten Zyklus. Auch fällt auf, dass die Leistung in den gadoliniumhaltigen Brennstäben (89G01, 89G03 und 89G05) am Anfang des ersten Zyklus relativ nochmal deutlich geringer als in dem reinen  $\text{UO}_2$  Brennstab der Proben 89G08 und 89G10 ist. Für die Abbrandrechnungen wurde die Leistungsgeschichte für jede Probennachrechnung mit einem konstanten Faktor so normiert, dass die Abweichung der berechneten zur gemessenen  $^{148}\text{Nd}$  Konzentration als Abbrandindikator minimiert wird.

Die isotopenaufgelöste Zusammensetzung der Proben wurden mithilfe zerstörender Analysemethoden ermittelt. Die ermittelten Konzentrationen werden in /MIC 17/ in

Gramm pro Tonne anfänglichem Schwermetall (g/tSMi) für Aktinoide bei Reaktorabschaltung angegeben. Dabei ist der Wert für  $^{239}\text{Pu}$  die Summe von  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{239}\text{Np}$ . Spaltprodukte werden in g/tSMi nach fünf Jahren Abklingzeit angegeben. Die für Ohi-2 zusätzlich ermittelte Gadolinium-Zusammensetzung wurde in Atom-% des kompletten Gadoliniums angegeben [ $^n\text{Gd} / \text{totalGd}$  [%]]. Für die Probe 91E07 sind die Werte in Tab. 2.10 gezeigt, für die Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 in Tab. 2.11 und in Tab. 2.12.

**Tab. 2.10** Nuklidzusammensetzung (zur Reaktorabschaltung) und Spaltprodukte (nach 5 Jahren Abklingzeit) der Probe 91E07 des Brennelements G13 aus Ohi-1

<b>Aktinoide</b>	<b>g/Mg</b>	<b>Spaltprodukte</b>	<b>g/Mg</b>
<b>Isotop</b>	<b>91E07</b>	<b>Isotop</b>	<b>91E07</b>
$^{232}\text{U}$	1,06E-03	$^{142}\text{Nd}$	4,99E+01
$^{234}\text{U}$	1,10E+02	$^{143}\text{Nd}$	8,91E+02
$^{235}\text{U}$	2,72E+03	$^{144}\text{Nd}$	2,23E+03
$^{236}\text{U}$	4,43E+03	$^{145}\text{Nd}$	9,33E+02
$^{238}\text{U}$	9,25E+05	$^{146}\text{Nd}$	1,13E+03
$^{237}\text{Np}$	5,98E+02	$^{148}\text{Nd}$	5,77E+02
$^{236}\text{Pu}$	2,23E-03	$^{150}\text{Nd}$	2,91E+02
$^{238}\text{Pu}$	3,87E+02	$^{106}\text{Ru}$	8,01E+00
$^{239}\text{Pu}$	5,26E+03	$^{110\text{m}1}\text{Ag}$	8,98E-03
$^{240}\text{Pu}$	3,04E+03	$^{125}\text{Sb}$	2,60E+00
$^{241}\text{Pu}$	1,74E+03	$^{134}\text{Cs}$	4,61E+01
$^{242}\text{Pu}$	1,35E+03	$^{137}\text{Cs}$	1,72E+03
$^{241}\text{Am}$	3,68E+01	$^{144}\text{Ce}$	3,87E+00
$^{242\text{m}1}\text{Am}$	9,56E-01	$^{154}\text{Eu}$	2,47E+01
$^{243}\text{Am}$	3,50E+02		
$^{242}\text{Cm}$	3,55E+01		
$^{243}\text{Cm}$	1,42E+00		
$^{244}\text{Cm}$	1,99E+02		
$^{245}\text{Cm}$	1,25E+01		
$^{246}\text{Cm}$	2,83E+00		
$^{247}\text{Cm}$	4,82E-02		

**Tab. 2.11** Nuklidzusammensetzung (zur Reaktorabschaltung) für die Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 des Brennelements 17G aus Ohi-2 (Aktinoide)

<b>Aktinoide</b>	<b>g/Mg</b>				
<b>Isotop</b>	<b>89G01</b>	<b>89G03</b>	<b>89G05</b>	<b>89G08</b>	<b>89G10</b>
<sup>232</sup> U	1,26E-03	1,76E-03	1,53E-03	3,26E-04	4,02E-04
<sup>234</sup> U	8,75E+01	7,47E+01	8,13E+01	1,71E+02	1,48E+02
<sup>235</sup> U	5,47E+03	3,65E+03	4,42E+03	9,10E+03	6,12E+03
<sup>236</sup> U	1,97E+03	2,23E+03	2,14E+03	3,84E+03	4,24E+03
<sup>238</sup> U	9,60E+05	9,53E+05	9,56E+05	9,45E+05	9,38E+05
<sup>237</sup> Np	2,21E+02	2,86E+02	2,45E+02	3,48E+02	4,44E+02
<sup>236</sup> Pu	3,78E-04	7,21E-04	5,72E-04	7,22E-04	1,32E-03
<sup>238</sup> Pu	6,82E+01	1,21E+02	9,35E+01	1,11E+02	1,90E+02
<sup>239</sup> Pu	5,36E+03	5,51E+03	5,52E+03	5,18E+03	5,32E+03
<sup>240</sup> Pu	2,15E+03	2,61E+03	2,42E+03	2,15E+03	2,61E+03
<sup>241</sup> Pu	1,24E+03	1,55E+03	1,43E+03	1,21E+03	1,49E+03
<sup>242</sup> Pu	4,28E+02	7,58E+02	6,05E+02	4,37E+02	7,51E+02
<sup>241</sup> Am	2,75E+01	3,65E+01	2,72E+01	2,73E+01	3,80E+01
<sup>242m1</sup> Am	4,77E-01	8,07E-01	5,09E-01	5,12E-01	6,29E-01
<sup>243</sup> Am	6,32E+01	1,47E+02	1,23E+02	6,78E+01	1,50E+02
<sup>242</sup> Cm	1,21E+01	1,99E+01	1,47E+01	1,22E+01	1,88E+01
<sup>243</sup> Cm	1,91E-01	4,99E-01	3,92E-01	2,76E-01	4,80E-01
<sup>244</sup> Cm	1,62E+01	5,70E+01	3,26E+01	1,85E+01	5,59E+01
<sup>245</sup> Cm	6,56E-01	2,88E+00	1,50E+00	7,67E-01	2,85E+00
<sup>246</sup> Cm	5,74E-02	3,67E-01	1,58E-01	7,19E-02	3,81E-01
<sup>247</sup> Cm	5,50E-04	4,88E-03	-	8,00E-04	4,05E-03

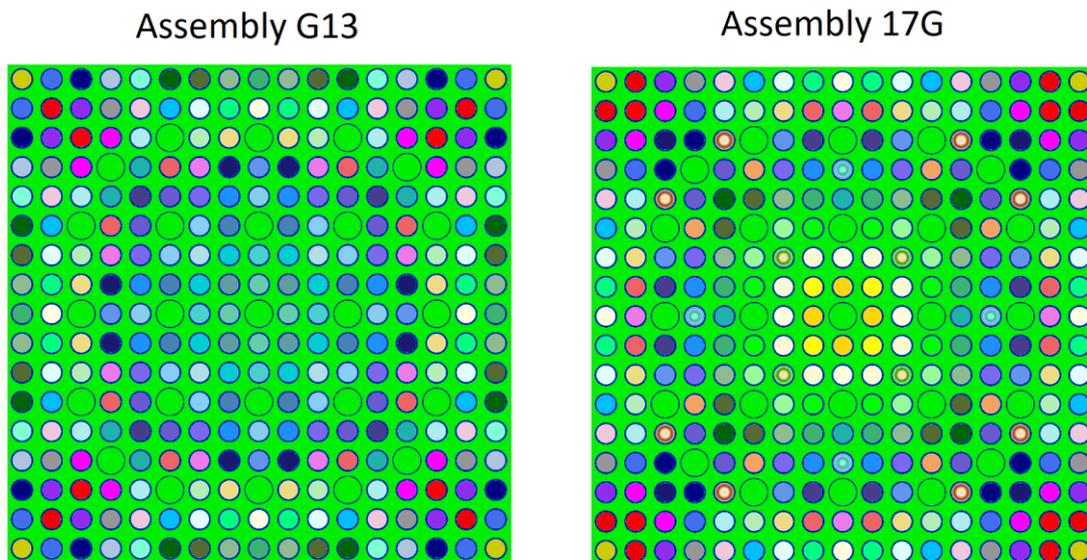
**Tab. 2.12** Nuklidzusammensetzung (nach 5 Jahren Abklingzeit) für die Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 des Brennelements 17G aus Ohi-2 (Spaltprodukte)

Spaltprodukte	g/Mg				
	89G01	89G03	89G05	89G08	89G10
<sup>142</sup> Nd	1,26E-03	1,76E-03	1,53E-03	3,26E-04	4,02E-04
<sup>143</sup> Nd	8,75E+01	7,47E+01	8,13E+01	1,71E+02	1,48E+02
<sup>144</sup> Nd	5,47E+03	3,65E+03	4,42E+03	9,10E+03	6,12E+03
<sup>145</sup> Nd	1,97E+03	2,23E+03	2,14E+03	3,84E+03	4,24E+03
<sup>146</sup> Nd	9,60E+05	9,53E+05	9,56E+05	9,45E+05	9,38E+05
<sup>148</sup> Nd	2,21E+02	2,86E+02	2,45E+02	3,48E+02	4,44E+02
<sup>150</sup> Nd	3,78E-04	7,21E-04	5,72E-04	7,22E-04	1,32E-03
<sup>106</sup> Ru	6,82E+01	1,21E+02	9,35E+01	1,11E+02	1,90E+02
<sup>110m1</sup> Ag	5,36E+03	5,51E+03	5,52E+03	5,18E+03	5,32E+03
<sup>125</sup> Sb	2,15E+03	2,61E+03	2,42E+03	2,15E+03	2,61E+03
<sup>134</sup> Cs	1,24E+03	1,55E+03	1,43E+03	1,21E+03	1,49E+03
<sup>137</sup> Cs	4,28E+02	7,58E+02	6,05E+02	4,37E+02	7,51E+02
<sup>144</sup> Ce	2,75E+01	3,65E+01	2,72E+01	2,73E+01	3,80E+01
<sup>154</sup> Eu	4,77E-01	8,07E-01	5,09E-01	5,12E-01	6,29E-01
<sup>152</sup> Gd	0,056	0,044	0,034	0,0	0,0
<sup>154</sup> Gd	1,818	1,748	1,674	0,0	0,0
<sup>155</sup> Gd	0,018	0,019	0,053	0,0	0,0
<sup>156</sup> Gd	34,60	34,545	34,260	0,0	0,0
<sup>157</sup> Gd	0,007	0,009	0,008	0,0	0,0
<sup>158</sup> Gd	41,520	41,640	41,870	0,0	0,0
<sup>160</sup> Gd	21,990	21,994	22,100	0,0	0,0

### 2.1.2 Modellierung

Bei der Modellierung wurde darauf geachtet die gegebenen experimentellen Bedingungen möglichst originalgetreu nachzubilden, dabei aber vorhandene Symmetrien auszunutzen, um die Rechnung zu vereinfachen, ohne Details zu verlieren. Zwar wurde das Brennelement komplett modelliert, aber aufgrund der Symmetrie entlang der Senkrechten, Horizontalen und der Diagonalen müssen nur für ein Achtel des Brennelements individuelle Brennstäbe modelliert werden. Dies reduziert die Anzahl an individuell zu betrachtenden Brennstäben auf 45. Abb. 2.4 zeigt die Implementierung der

beiden Brennelemente in der Geometriedarstellung des von MOTIVE angesteuerten Neutronentransportprogramms KENO-VI. Beim Brennelement 17G wurden die gadoliniumhaltigen Brennstäbe für die Berechnung in zehn Ringzonen mit gleicher Fläche unterteilt, um den aufgrund der Neutronenselbstabschirmung radial variierenden Gadoliniumabbrand genauer berechnen zu können.



**Abb. 2.4** Implementierung der Brennelemente in SCALE-Geometrie

Die Brennstäbe wurden wie in den experimentellen Daten angegeben mit einem heliumgefüllten Zwischenraum zwischen Brennstoff und Hüllrohr modelliert (Kernzahldichte =  $2.404400E-04$ ). Die geometrischen Abmessungen und Materialdaten wurden wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben übernommen. Es wurde eine Axialzone mit 10 cm Höhe und reflektierenden Randbedingungen in alle Richtungen modelliert. Die Parameter der Abbrandrechnungen sind in Tab. 2.13 wiedergegeben. Diese wurden auch in allen folgenden Analysen verwendet. In KENO-VI wurden dabei 500 Generationen mit jeweils 40000 Neutronen gerechnet. Die Rechnung wurde bei einer Monte Carlo Unsicherheit von  $\sigma = 5 \cdot 10^{-4}$  abgebrochen. Während MOTIVE in der Abbrandrechnung 3820 Nuklide verfolgt, wurden in die Ergebnisdateien nur diejenigen ausgegeben, für die auch durch Nachbestrahlungsanalysen experimentelle Werte vorliegen. Die betrachteten Nuklide sind in Tab. 2.14 angegeben.

**Tab. 2.13** Parameter der Abbrandrechnung

Parameter	Wert
Neutronentransportcode	KENO-VI aus SCALE 6.2.2
Inventarcode	Ventina
Wirkungsquerschnittsbibliothek	ENDF/B-VII.1
# Energiegruppen	27.687
Prediktor-Corrector Methode	Standard

**Tab. 2.14** Liste der betrachteten Nuklide

Betrachtete Nuklide						
<sup>232</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>238</sup> U		
<sup>237</sup> Np	<sup>239</sup> Np					
<sup>236</sup> Pu	<sup>238</sup> Pu	<sup>239</sup> Pu	<sup>240</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu	<sup>242</sup> Pu	
<sup>241</sup> Am	<sup>242m1</sup> Am	<sup>243</sup> Am				
<sup>242</sup> Cm	<sup>243</sup> Cm	<sup>244</sup> Cm	<sup>245</sup> Cm	<sup>246</sup> Cm	<sup>247</sup> Cm	
<sup>142</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd	<sup>144</sup> Nd	<sup>145</sup> Nd	<sup>146</sup> Nd	<sup>148</sup> Nd	<sup>150</sup> Nd
<sup>106</sup> Ru	<sup>110m1</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb				
<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs					
<sup>144</sup> Ce	<sup>154</sup> Eu					
<sup>152</sup> Gd	<sup>154</sup> Gd	<sup>155</sup> Gd	<sup>156</sup> Gd	<sup>157</sup> Gd	<sup>158</sup> Gd	<sup>160</sup> Gd

### 2.1.3 Resultate

Die Präsentation der Ergebnisse zu den einzelnen Probennachrechnungen folgt für alle betrachteten Experimente der gleichen Vorgehensweise. Daher wird am vorliegenden Beispiel dieses Vorgehen ausführlich erläutert. Die Ergebnispräsentation der nachfolgenden Kapitel nimmt dann jeweils auf die hier folgenden Erläuterungen Bezug.

Die Ergebnisse der Probennachrechnungen werden zunächst jeweils in tabellarischer Form und in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Als Maß der Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment wird dabei die Größe C/E-1 verwendet und diese in Form von Prozentwerten dargestellt. Dabei steht C für die berechnete Konzentration des jeweiligen Nuklids und E für die experimentell ermittelte Konzentration. Betrachtet werden also jeweils relative Unterschiede zwischen Rechen- und Messergebnis, wobei positive Werte bedeuten, dass die Rechnung die jeweilige Nuklidkonzentration im Vergleich zum Messergebnis überschätzt, und negative Werte einer Unterschätzung der

Nuklidkonzentrationen entsprechen. Die Betrachtung der relativen Abweichungen erlaubt Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Daten, da diese unabhängig von absoluten Werten sind. Aus diesem Grund hat sich eine entsprechende Darstellungsweise in der Literatur durchgesetzt, weshalb dadurch auch eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Veröffentlichungen gegeben ist. Allerdings fallen gleiche absolute Abweichungen bei Nukliden, die nur in geringen Mengen vorkommen, bei einer Darstellung relativer Unterschiede stärker ins Gewicht als bei Nukliden, die in größeren Mengen vorkommen. Dies ist nicht direkt aus den Daten ersichtlich und muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

In der graphischen Darstellung der C/E-1-Werte wird jeweils die zugehörige Messunsicherheit, wie sie in der Literatur angegeben ist, in Form von Fehlerbalken mit angegeben. Dargestellt sind dabei jeweils die Werte die  $\pm 1\sigma$  entsprechen.

Zusätzlich zu den einzelnen C/E-1-Werten wird auch jeweils das Ergebnis einer Mittelung über alle Proben eines Probenbrennstabs angegeben. Dabei werden Mittelwert und Standardabweichung für diese Mittelung dargestellt. Aus diesen Daten lässt sich eine Aussage über eine mögliche systematische Abweichung zwischen Rechnung und Experiment treffen, wenn man annimmt, dass sich statistische Unsicherheiten herausmitteln. Allerdings lässt sich damit noch keine Aussage treffen, ob eine mögliche systematische Abweichung vom Rechenprogramm oder vom Experiment herrührt. Die bei der Mittelung bestimmte Standardabweichung stellt ein Maß für die Streuung und somit die Konsistenz der einzelnen Probennachrechnungen dar. Eine große Varianz zwischen den einzelnen C/E-1-Werten deutet im Allgemeinen auf Probleme bei der Messung eines bestimmten Nuklids hin, da man davon ausgehen kann, dass die Berechnung der Nuklidkonzentrationen konsistent erfolgt und hier keine große Streuung (eher eine systematische Abweichung) zu erwarten ist.

In Tab. 2.15 sind die Ergebnisse der Nachrechnungen der insgesamt sechs Proben aus den beiden Reaktoren Ohi-1 und Ohi-2 als Vergleich zwischen Rechnung und Experiment aufgeführt. Diese Daten werden in Abb. 2.5 und Abb. 2.6 graphisch dargestellt. Alle Proben weisen eine relativ starke Überschätzung der  $^{235}\text{U}$  Konzentration im Bereich zwischen 5 und 10 % auf, wohingegen der Gehalt an  $^{239}\text{Pu}$  gut getroffen wird. Dies weist möglicherweise auf eine relativ hohe Unsicherheit in der Abbrandbestimmung hin, obwohl der angegebene Wert für die Messunsicherheit von  $^{148}\text{Nd}$  sehr klein ist. Die übrigen Uran- und Plutoniumnuklide sowie  $^{237}\text{Np}$  weisen eine Übereinstimmung

auf, die im Rahmen der Werte vergleichbarer Nachrechnungen liegt. Ausnahmen bilden hier  $^{232}\text{U}$  und  $^{236}\text{Pu}$  aufgrund der geringen absoluten Konzentrationen. Die übrigen Aktinoiden weisen Abweichungen erwarteter Größe auf, wobei der Wert für  $^{241}\text{Am}$  der Probe 91E07 durch größere Abweichungen heraussticht. Hier liegt möglicherweise ein Problem bei der Messung vor. Die Abweichungen der Spaltprodukte liegen ebenfalls im von anderen Nachrechnungen bekannten Rahmen. Die großen Abweichungen bei  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  und  $^{125}\text{Sb}$  lassen sich mit experimentellen Schwierigkeiten begründen. Es ist bekannt, dass metallische Spaltprodukte eine schlechte Löslichkeit bei den üblicherweise verwendeten Spaltproduktlösungen aufweisen und teilweise ausfallen, so dass die Messwerte die tatsächlichen Konzentrationen im Brennstoff oft stark unterschätzen. Dieses Problem wird erst bei aktuelleren experimentellen Programmen durch zusätzliche Verfahrensschritte behoben.

In Tab. 2.16 und Abb. 2.7 sind jeweils die Ergebnisse der Mittelung über die Proben aus Ohi-2 gezeigt. Hier wird eine leichte Unterschätzung der höheren Aktinoide sowie eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment bei den Spaltprodukten sichtbar.

**Tab. 2.15** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für Ohi-1 und Ohi-2

Reaktor	Ohi1	Ohi2				
Probe	91E07	89G01	89G03	89G05	89G08	89G10
<sup>232</sup> U	31.1	-86.2	-85.2	-86.0	-9.2	12.6
<sup>234</sup> U	5.9	1.3	2.2	0.8	3.3	2.8
<sup>235</sup> U	11.0	5.5	6.9	6.8	8.0	8.5
<sup>236</sup> U	-0.4	0.3	-0.6	-1.2	-1.8	-1.6
<sup>238</sup> U	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
<sup>237</sup> Np	5.1	-3.5	0.2	1.9	-3.0	1.6
<sup>236</sup> Pu	40.0	65.3	51.5	49.1	36.1	29.9
<sup>238</sup> Pu	-0.4	-2.0	-5.0	-7.3	-6.9	-6.5
<sup>239</sup> Pu	0.1	-3.3	-3.9	-4.8	-2.0	-2.4
<sup>240</sup> Pu	-2.6	-2.7	-3.9	-4.1	-5.1	-4.8
<sup>241</sup> Pu	-2.9	-2.8	-5.0	-5.3	-5.6	-5.3
<sup>242</sup> Pu	-7.4	-1.4	-4.4	-5.9	-9.6	-9.8
<sup>241</sup> Am	39.0	-14.1	-29.6	-22.0	4.7	-19.2
<sup>242m1</sup> Am	-17.3	-29.2	-53.3	-39.7	-19.1	-28.0
<sup>243</sup> Am	-11.1	-1.6	-7.8	-21.5	-12.2	-14.6
<sup>242</sup> Cm	0.3	-15.8	-19.3	-20.1	-9.1	-8.4
<sup>243</sup> Cm	-6.6	22.9	-4.8	-21.6	-9.5	3.5
<sup>244</sup> Cm	-9.5	3.6	-10.3	-4.9	-12.3	-13.5
<sup>245</sup> Cm	2.7	16.5	-0.4	5.3	-2.3	-3.3
<sup>246</sup> Cm	-20.7	-3.6	-18.3	-11.8	-25.0	-24.5
<sup>247</sup> Cm	-22.2	-17.6	-31.9	-	-44.1	-21.6
<sup>142</sup> Nd	1.0	-10.6	-11.4	-35.7	-0.6	-5.5
<sup>143</sup> Nd	6.0	1.3	2.8	2.6	1.9	3.4
<sup>144</sup> Nd	-1.5	-1.2	-0.7	0.1	-1.7	-0.8
<sup>145</sup> Nd	1.5	0.0	0.7	0.4	0.3	1.2
<sup>146</sup> Nd	-0.6	-1.2	-1.0	-1.0	-0.8	-0.8
<sup>148</sup> Nd	0.0	-0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
<sup>150</sup> Nd	-0.5	-0.9	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5
<sup>106</sup> Ru	-0.5	2.5	4.3	5.0	0.3	3.5
<sup>110m1</sup> Ag	33.6	86.5	113.6	102.1	17.8	-
<sup>125</sup> Sb	38.4	38.5	41.4	50.2	53.2	67.8
<sup>134</sup> Cs	-3.2	-2.3	-3.0	-2.5	1.9	2.1
<sup>137</sup> Cs	-4.3	-0.8	-2.9	-2.0	7.1	4.8
<sup>144</sup> Cs	2.6	5.1	19.4	15.5	-3.2	0.2
<sup>154</sup> Eu	11.7	9.7	9.7	9.7	20.7	21.1

**Tab. 2.16** Mittelwert und Standardabweichung bei Mittelung der Proben aus Ohi-2

	# Proben	C/E - 1 Mittelwert	C/E - 1 Standardabweichung
<sup>232</sup> U	5	-50.8	43.4
<sup>234</sup> U	5	2.1	0.9
<sup>235</sup> U	5	7.2	1.0
<sup>236</sup> U	5	-1.0	0.7
<sup>238</sup> U	5	0.2	0.0
<sup>237</sup> Np	5	-0.6	2.3
<sup>236</sup> Pu	5	46.4	12.4
<sup>238</sup> Pu	5	-5.5	2.0
<sup>239</sup> Pu	5	-3.3	1.0
<sup>240</sup> Pu	5	-4.1	0.8
<sup>241</sup> Pu	5	-4.8	1.0
<sup>242</sup> Pu	5	-6.2	3.2
<sup>241</sup> Am	5	-16.0	11.5
<sup>242m1</sup> Am	5	-33.9	11.7
<sup>243</sup> Am	5	-11.5	6.7
<sup>242</sup> Cm	5	-14.5	4.9
<sup>243</sup> Cm	5	-1.9	14.8
<sup>244</sup> Cm	5	-7.5	6.3
<sup>245</sup> Cm	5	3.2	7.3
<sup>246</sup> Cm	5	-16.6	8.1
<sup>247</sup> Cm	4	-28.8	10.3
<sup>142</sup> Nd	5	-12.8	12.1
<sup>143</sup> Nd	5	2.4	0.8
<sup>144</sup> Nd	5	-0.9	0.6
<sup>145</sup> Nd	5	0.5	0.4
<sup>146</sup> Nd	5	-0.9	0.2
<sup>148</sup> Nd	5	0.0	0.1
<sup>150</sup> Nd	5	-0.6	0.1
<sup>106</sup> Ru	5	3.1	1.6
<sup>110m1</sup> Ag	4	80.0	37.2
<sup>125</sup> Sb	5	50.2	10.3
<sup>134</sup> Cs	5	-0.8	2.3
<sup>137</sup> Cs	5	1.2	4.0
<sup>144</sup> Cs	5	7.4	8.7
<sup>154</sup> Eu	5	14.2	5.5

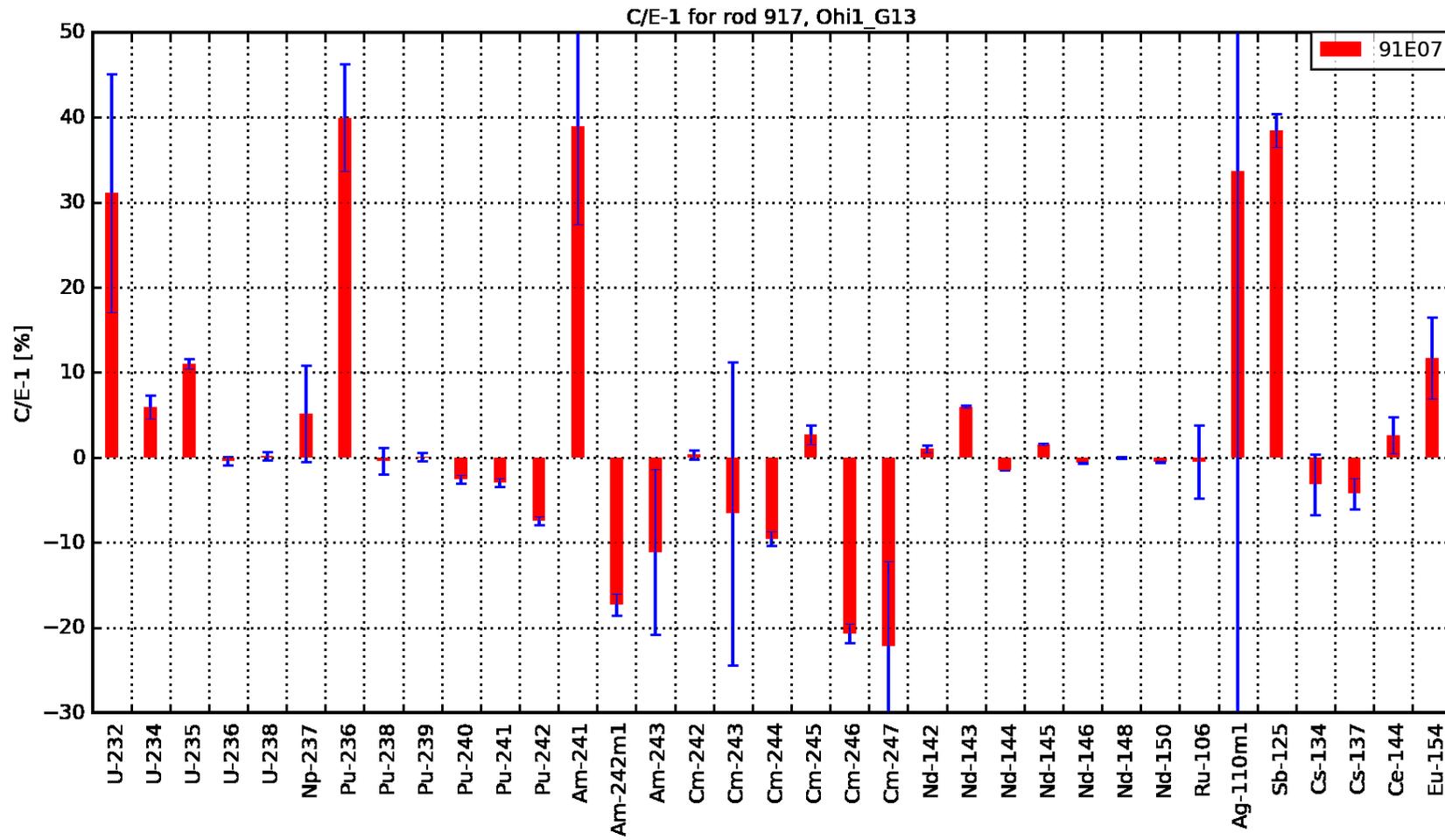


Abb. 2.5 Ohi-1, Probe 91E07: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

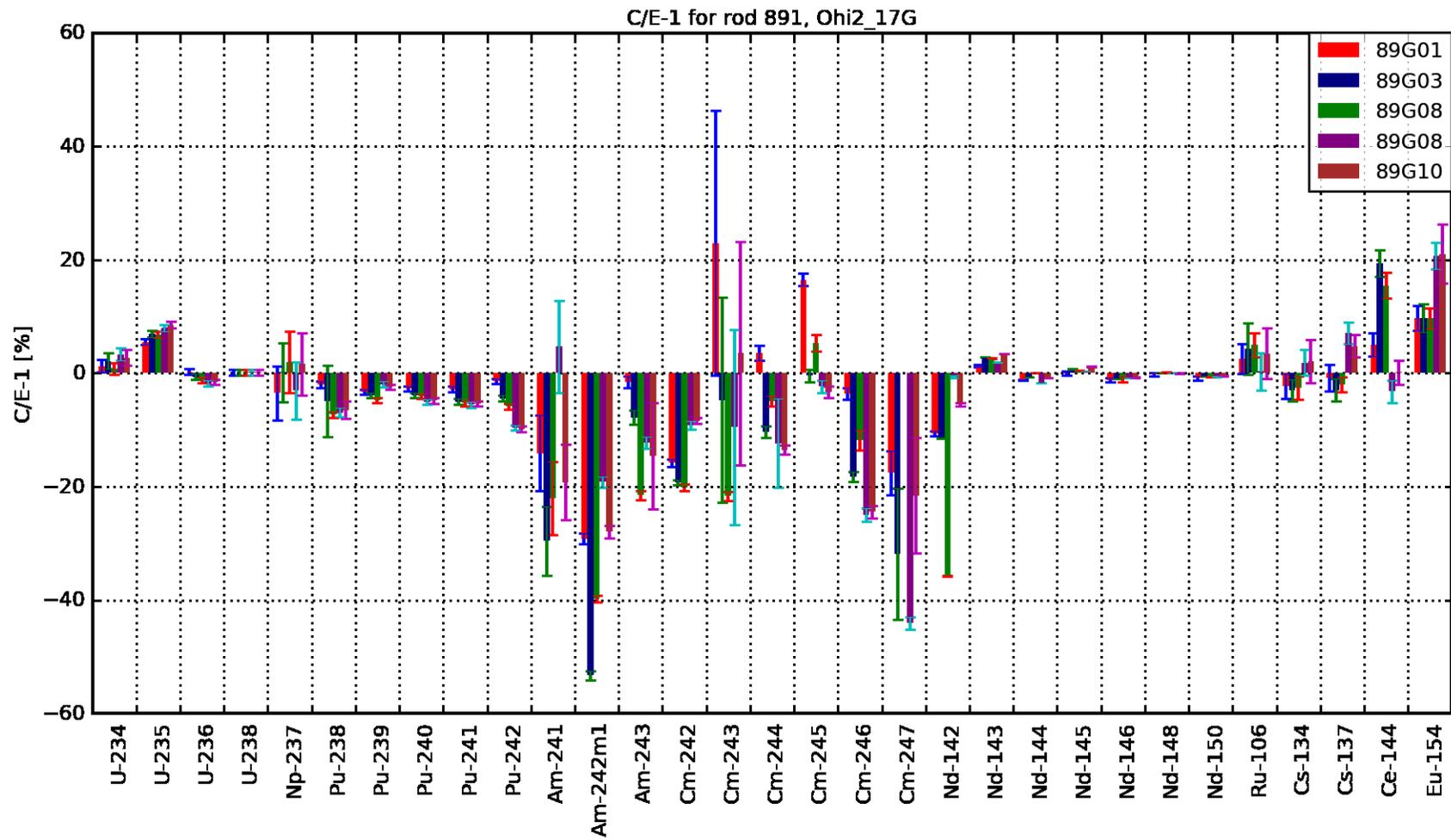


Abb. 2.6 Ohi-2 Proben: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

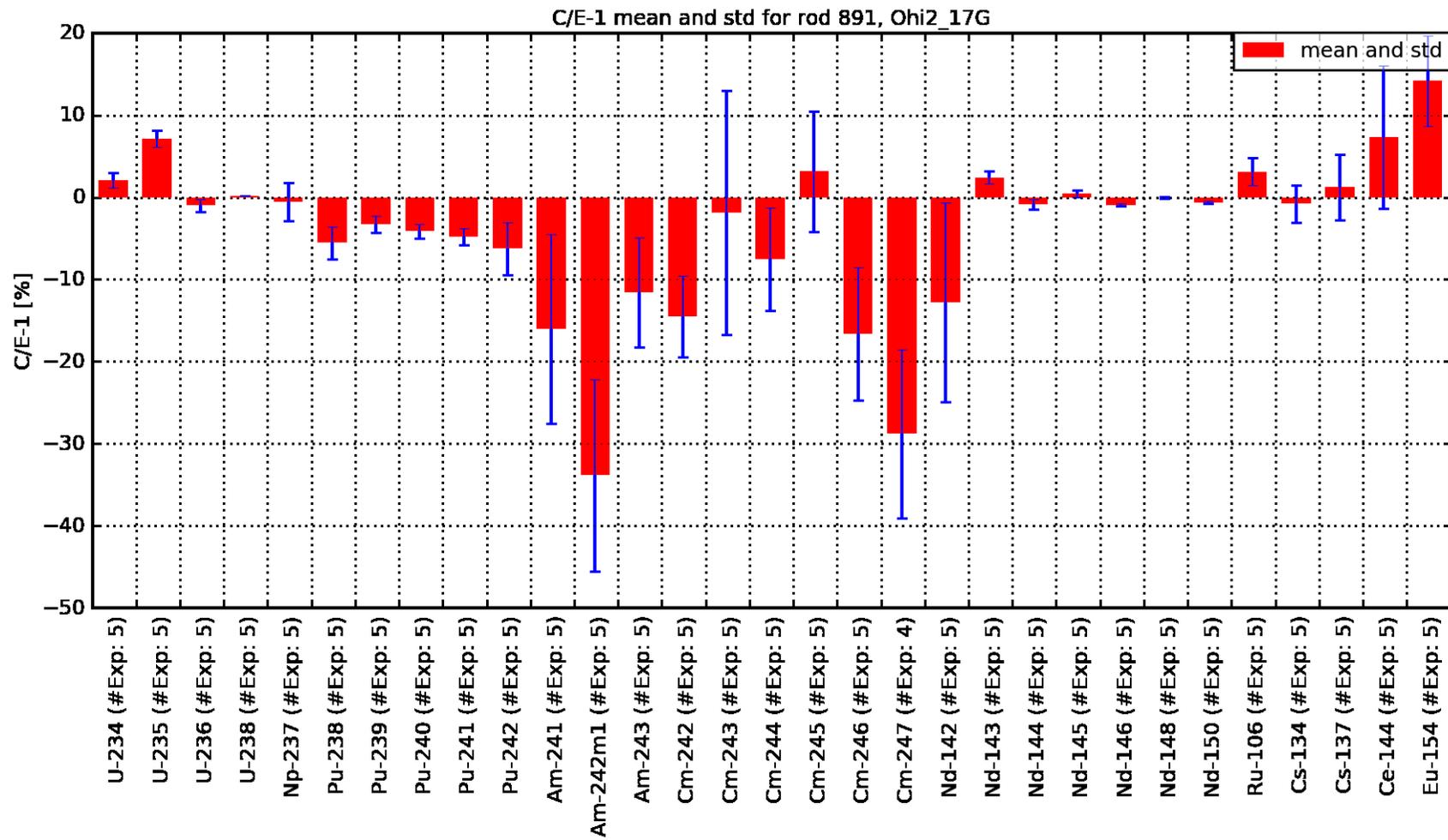


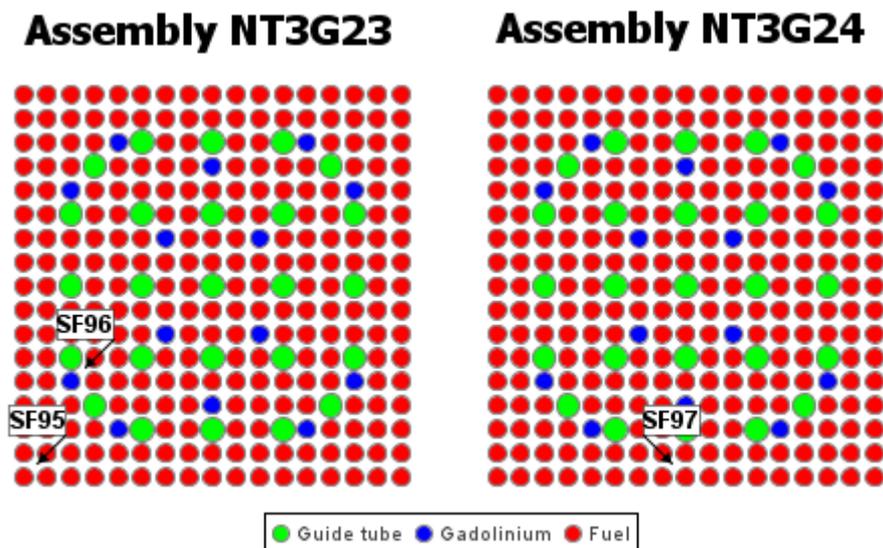
Abb. 2.7 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über alle Proben von Ohi-2

## 2.2 Proben des Reaktors Takahama-3

Aus dem Druckwasserreaktor Takahama-3, der von der japanischen Kansai Electric Power Co., Inc. betrieben wird, gibt es insgesamt 16 Nachbestrahlungsanalyseproben aus drei Brennstäben aus zwei Brennelementen, die zwei bzw. drei Zyklen bestrahlt wurden. Takahama-3 hat eine thermische Leistung von 2652 MW und verwendet ein 17 x 17-Brennelement-Design mit gadoliniumhaltigen Brennstäben. Die Angaben zu Brennelementgeometrien, Materialdaten und Abbrandhistorien stammen vorwiegend aus der Datenbank SFCOMPO /MIC 17/ und wurden teilweise aus der Veröffentlichung /SAN 03/ ergänzt.

### 2.2.1 Experimentelle Daten

Bei beiden Brennelementen handelt es sich um 17 x 17 DWR Brennelemente mit 24 Steuerstabführungsrohren, einem zentralen Instrumentierungsrohr und 16 Brennstäben mit dem abbrennbaren Neutronenabsorber  $Gd_2O_3$ . In Abb. 2.8 ist die schematische Darstellung der zwei Brennelemente mit den unterschiedlichen Brennstäben farblich kodiert dargestellt /MIC 17/.



**Abb. 2.8** Schematische Darstellung der Brennelemente NT3G23 und NT3G24 aus Takahama-3

Aus dem Brennelement NT3G23 (Zyklus 5 und 6) wurden aus dem Brennstab SF95 und dem gadoliniumhaltigen Brennstab SF96 jeweils fünf Proben entnommen. Aus dem Brennelement NT3G24 (Zyklus 5 bis 7) wurden sechs Proben aus dem Brennstab

SF97 entnommen. Die Proben wurden jeweils bei unterschiedlichen axialen Höhen entnommen.

In Tab. 2.17 sind die relevanten gemeinsamen geometrischen Abmessungen der Brennelemente wiedergegeben, in Tab. 2.18 die relevanten gemeinsamen geometrischen Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentierungsrohre.

Weitere Details der Brennstäbe SF95, SF96, und SF97 finden sich in Tab. 2.19. Details zu den einzelnen Proben der drei Brennstäbe in Tab. 2.20, Tab. 2.21 und Tab. 2.22.

**Tab. 2.17** Geometrische Abmessungen der Brennelemente G13 und 17G /MIC 17/, /SUY 11/

<b>Parameter</b>	
Gittertyp	17 x 17
Brennstababstand [cm]	1,26
Brennelementabstand [cm]	21,4
Brennstablänge [cm]	385,2
Aktive Brennstablänge [cm]	364,8
Anzahl BEs	264
Anzahl Führungsrohre	25

**Tab. 2.18** Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre /MIC 17/, /SUY 11/

Parameter	
Durchmesser Brennstoff [cm]	0,805
Durchmesser innen Hüllrohr [cm]	0,822
Durchmesser außen Hüllrohr [cm]	0,95
Material Hüllrohr	Zircaloy-4
Dichte Hüllrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,44
Dichte Brennstoff [g/cm <sup>3</sup> ]	10,412
Durchmesser innen Führungsrohr [cm]	1,143
Durchmesser außen Führungsrohr [cm]	1,2242
Material Führungsrohr	Zircaloy-4
Dichte Führungsrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,44

**Tab. 2.19** Relevante Details der Brennstäbe SF95, SF96 und SF97

Parameter	SF95	SF96	SF97
BE	NT3G23	NT3G23	NT3G24
Anzahl Bestrahlungszyklen	2	2	3
Bestrahlungsdauern [Tagen] (Ruhezeiten [Tagen])	385 (88) 402	385 (88) 402	385 (88) 402 (62) 406

**Tab. 2.20** Relevante Details der Proben des Brennstabs SF95

Parameter	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Probenabbrand [GWd/tSM]	14,3	24,35	35,42	36,69	30,4
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	360,6	344,6	292,6	164,6	24,6

**Tab. 2.21** Relevante Detail der Proben des Brennstabs SF96

Parameter	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Probenabbrand [GWd/tSM]	7,79	16,44	28,2	28,91	24,19
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	363,1	347,1	295,1	167,1	270,1

**Tab. 2.22** Relevante Detail der Proben des Brennstabs SF97

Parameter	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Probenabbrand [GWd/tSM]	17,69	30,73	42,16	47,03	47,25	40,79
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	366,4	345,7	318,0	196,8	88,1	25,1

In Tab. 2.23 sind die Anreicherungen der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberstäbe wiedergegeben.

Details zur Brennstoffzusammensetzung wurden /MIC 17/ entnommen. Die Anreicherungen der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberstäbe sowie die nuklidweisen Werte sind in Tab. 2.23 wiedergegeben. Die angegebenen Gew-% wurden für die Rechnung unter Berücksichtigung der Dichte des Brennstoffs in Kernzahldichten umgerechnet. Für den Gadoliniumvektor wurde in Ermangelung direkter Referenzen diejenige Isotopenverteilung von Gadolinium angenommen, die in /SUY 11/ für den Ohi-2 Reaktor dokumentiert ist, da in diesem Reaktor Brennelemente mit demselben Design verwendet werden.

**Tab. 2.23** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberbrennstäbe

Isotop	Brennstäbe		Absorberstäbe	
	[Gew. %]	Kernzahldichten	[Gew. %]	Kernzahldichten
<sup>234</sup> U	0,04	9,4474E-06	0,02	4,4404E-06
<sup>235</sup> U	4,11	9,6659E-04	2,63	5,8143E-04
<sup>238</sup> U	95,85	2,2258E-02	97,25	2,1250E-02
<sup>nat</sup> Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	6	
<sup>152</sup> Gd			0,19	4,0803E-06
<sup>154</sup> Gd			2,13	4,5148E-05
<sup>155</sup> Gd			14,58	3,0705E-04
<sup>156</sup> Gd			20,3	4,2477E-04
<sup>157</sup> Gd			15,62	3,2476E-04
<sup>158</sup> Gd			24,95	5,1546E-04
<sup>160</sup> Gd			22,23	4,5353E-04
<sup>16</sup> O				4,6784E-02

Nach /MIC 17/ bestehen alle Strukturmaterialien aus Zirkaloy-4. Hierfür wurden die Kernzahldichten mit der angegebenen Dichte und der natürlichen Isotopen-Zusammensetzung (aus /MAG 18/). Die verwendeten Werte sind in Tab. 2.24 wiedergegeben. /MIC 17/ gibt auch die Bestrahlungsgeschichte in Form von spezifischer Leistung der Proben und Bor-Konzentration an. Die verwendeten Werte für die Proben aus Brennstab SF95 sind in Tab. 2.25 wiedergegeben, die für Brennstab SF96 in Tab. 2.26 und die für Brennstab SF97 in Tab. 2.27.

**Tab. 2.24** Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-4

Element	[wt.-%]	Isotope	Kernzahl- dichten	Element	[wt.-%]	Isotope	Kernzahl- dichten		
Zr	98,23	<sup>90</sup> Zr	2,1778E-02	Fe	0,21	<sup>54</sup> Fe	8,8154E-06		
		<sup>91</sup> Zr	4,6971E-03			<sup>56</sup> Fe	1,3344E-04		
		<sup>92</sup> Zr	7,1016E-03			<sup>57</sup> Fe	3,0277E-06		
		<sup>94</sup> Zr	7,0437E-03			<sup>58</sup> Fe	3,9598E-07		
		<sup>96</sup> Zr	1,1111E-03	Cr	0,1	<sup>50</sup> Cr	3,3702E-06		
Sn	1,45	<sup>112</sup> Sn	4,8703E-06			<sup>52</sup> Cr	6,2491E-05		
		<sup>114</sup> Sn	3,2557E-06			<sup>53</sup> Cr	6,9523E-06		
		<sup>115</sup> Sn	1,6626E-06			<sup>54</sup> Cr	1,6985E-06		
		<sup>116</sup> Sn	7,0487E-05			Hf	0,01	<sup>174</sup> Hf	3,5662E-09
		<sup>117</sup> Sn	3,6913E-05					<sup>176</sup> Hf	1,1591E-07
		<sup>118</sup> Sn	1,1542E-04					<sup>177</sup> Hf	4,0754E-07
		<sup>119</sup> Sn	4,0593E-05					<sup>178</sup> Hf	5,9437E-07
		<sup>120</sup> Sn	1,5268E-04	<sup>179</sup> Hf	2,9509E-07				
		<sup>122</sup> Sn	2,1341E-05	<sup>180</sup> Hf	7,5582E-07				
<sup>124</sup> Sn	2,6258E-05								

**Tab. 2.25** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 und 6 für die Proben aus Brennstab SF95

Zyklus	Zeit-schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]				
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
5	12	1139	5,08	8,65	12,59	13,04	10,8
	8	1115	20,32	34,61	50,34	52,15	43,2
	27	1072	20,33	34,62	50,36	52,17	43,22
	35	996	20,42	34,78	50,59	52,4	43,42
	28	919	20,22	34,44	50,09	51,89	42,99
	21	859	20,09	34,23	49,78	51,57	42,73
	35	790	20,02	34,1	49,6	51,37	42,56
	35	704	19,71	33,57	48,83	50,58	41,9
	28	627	19,72	33,59	48,85	50,61	41,93
	27	559	19,6	33,39	48,57	50,31	41,68
	49	466	19,33	32,92	47,89	49,6	41,1
	15	388	19,07	32,47	47,23	48,93	40,54
	37	324	18,8	32,03	46,59	48,26	39,98
	19	255	18,61	31,71	46,12	47,77	39,58
	9	221	18,5	31,51	45,84	47,48	39,34
Revision	88	0	0	0	0	0	0
6	10	1121	4,36	7,43	10,8	11,19	9,27
	11	1097	17,52	29,85	43,42	44,97	37,26
	20	1062	17,69	30,14	43,84	45,41	37,62
	23	1014	17,78	30,28	44,04	45,62	37,79
	28	957	17,75	30,23	43,97	45,55	37,74
	28	894	17,72	30,17	43,89	45,46	37,67
	28	831	17,68	30,12	43,8	45,37	37,59
	35	760	17,65	30,06	43,72	45,29	37,52
	28	689	17,61	30	43,63	45,2	37,45
	34	619	17,57	29,93	43,53	45,09	37,35
	43	533	17,5	29,81	43,36	44,91	37,21
	28	453	17,34	29,53	42,95	44,49	36,86
	28	390	17,17	29,25	42,54	44,06	36,51

Zyklus	Zeit- schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]				
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
	35	319	17,08	29,09	42,31	43,82	36,31
	15	263	17	28,96	42,12	43,63	36,15
	8	237	16,97	28,91	42,05	43,56	36,09

**Tab. 2.26** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 und 6 für die Proben aus Brennstab SF96

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]				
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
5	12	1139	0,99	2,09	3,59	3,68	3,08
	8	1115	3,97	8,37	14,37	14,73	12,32
	27	1072	4,21	8,88	15,24	15,62	13,07
	35	996	4,47	9,44	16,19	16,6	13,89
	28	919	5,04	10,64	18,25	18,7	15,65
	21	859	5,64	11,9	20,42	20,93	17,52
	35	790	6,39	13,48	23,13	23,71	19,84
	35	704	7,97	16,82	28,85	29,57	24,75
	28	627	8,9	18,78	32,21	33,02	27,63
	27	559	9,84	20,76	35,61	36,5	30,55
	49	466	10,71	22,59	38,75	39,72	33,24
	15	388	11,42	24,1	41,34	42,37	35,46
	37	324	12,13	25,59	43,9	44,99	37,66
	19	255	12,34	26,04	44,68	45,79	38,32
	9	221	12,61	26,59	45,62	46,76	39,14
Revision	88	0	0	0	0	0	0
6	10	1121	5,61	11,84	20,32	20,83	17,43
	11	1097	11,3	23,84	40,9	41,92	35,08
	20	1062	11,45	24,16	41,45	42,48	35,55
	23	1014	11,57	24,41	41,88	42,93	35,93
	28	957	11,64	24,56	42,13	43,18	36,14
	28	894	11,71	24,7	42,37	43,43	36,35
	28	831	11,78	24,86	42,64	43,71	36,58
	35	760	11,86	25,01	42,91	43,99	36,81
	28	689	11,93	25,16	43,16	44,24	37,02
	34	619	11,99	25,29	43,38	44,46	37,21
	43	533	12,06	25,44	43,65	44,74	37,44
	28	453	12,06	25,44	43,65	44,74	37,44
	28	390	12,04	25,4	43,57	44,66	37,38

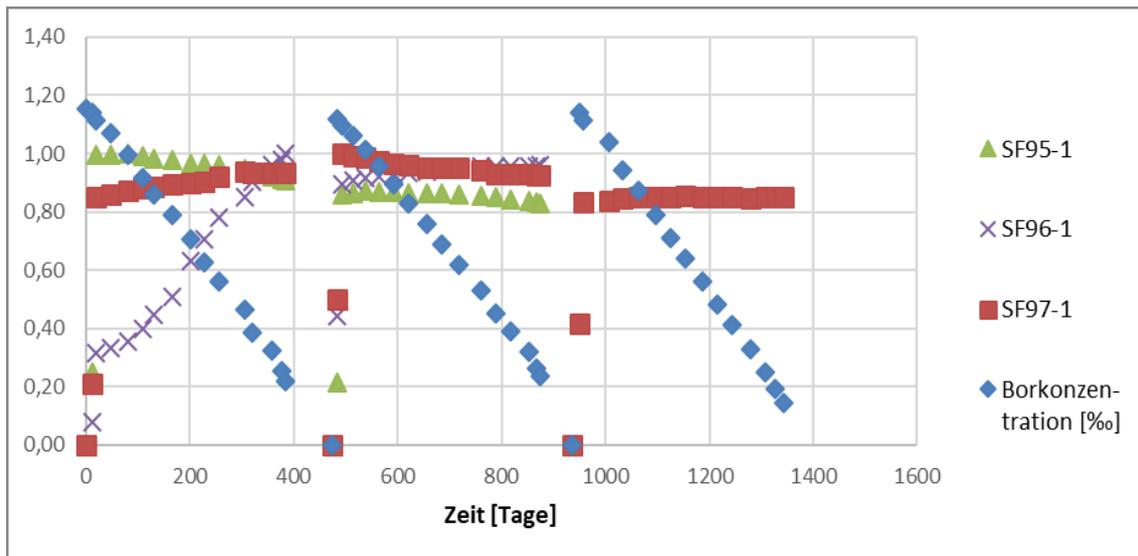
Zyklus	Zeit- schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]				
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
	35	319	12,07	25,45	43,67	44,76	37,46
	15	263	12,08	25,48	43,72	44,81	37,5
	8	237	12,09	25,5	43,74	44,83	37,52

**Tab. 2.27** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 bis 7 für die Proben aus Brennstab SF97

Zyklus	Zeit- schritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]					
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
5	12	1139	3,54	6,15	8,44	9,42	9,46	8,17
	8	1115	14,24	24,74	33,94	37,86	38,04	32,84
	27	1072	14,37	24,96	34,24	38,2	38,38	33,13
	35	996	14,57	25,31	34,72	38,73	38,91	33,59
	28	919	14,73	25,59	35,1	39,16	39,34	33,96
	21	859	14,81	25,74	35,31	39,39	39,58	34,17
	35	790	14,93	25,95	35,6	39,71	39,9	34,44
	35	704	15,02	26,09	35,8	39,93	40,12	34,63
	28	627	15,12	26,27	36,04	40,21	40,4	34,87
	27	559	15,43	26,81	36,78	41,03	41,22	35,58
	49	466	15,66	27,21	37,33	41,64	41,84	36,12
	15	388	15,65	27,2	37,31	41,62	41,82	36,1
	37	324	15,64	27,18	37,29	41,6	41,79	36,08
	19	255	15,62	27,14	37,23	41,53	41,72	36,02
	9	221	15,59	27,09	37,17	41,46	41,66	35,96
Revision	88	0	0	0	0	0	0	0
6	10	1121	8,39	14,58	20	22,31	22,42	19,35
	11	1097	16,72	29,06	39,87	44,47	44,68	38,57
	20	1062	16,61	28,85	39,58	44,16	44,37	38,3
	23	1014	16,49	28,65	39,3	43,84	44,05	38,02
	28	957	16,29	28,31	38,84	43,32	43,53	37,57

Zyklus	Zeit- schritte [d]	Borkonzen- tration [ppm]	Leistung [MW/tSM]					
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
	28	894	16,12	28	38,42	42,86	43,06	37,17
	28	831	16,03	27,85	38,21	42,62	42,82	36,97
	35	760	15,94	27,7	38	42,39	42,59	36,76
	28	689	15,93	27,69	37,98	42,37	42,57	36,75
	34	619	15,91	27,64	37,91	42,3	42,49	36,68
	43	533	15,76	27,39	37,58	41,92	42,12	36,36
	28	453	15,58	27,08	37,14	41,44	41,63	35,94
	28	390	15,53	26,99	37,03	41,31	41,5	35,83
	35	319	15,54	27,01	37,05	41,33	41,53	35,85
	15	263	15,47	26,88	36,87	41,13	41,33	35,67
	8	237	15,44	26,83	36,81	41,06	41,25	35,61
Revision	62	0	0	0	0	0	0	0
7	12	1139	6,97	12,11	16,62	18,54	18,63	16,08
	8	1113	13,96	24,25	33,27	37,11	37,29	32,19
	49	1041	14,03	24,39	33,45	37,32	37,49	32,37
	28	943	14,14	24,57	33,7	37,6	37,77	32,61
	29	871	14,22	24,7	33,89	37,8	37,98	32,79
	34	791	14,21	24,69	33,87	37,79	37,96	32,77
	28	712	14,2	24,68	33,86	37,77	37,95	32,76
	28	641	14,27	24,79	34,01	37,94	38,11	32,9
	35	561	14,25	24,75	33,96	37,88	38,06	32,85
	27	483	14,21	24,69	33,87	37,79	37,96	32,77
	29	412	14,22	24,72	33,91	37,82	38	32,8
	35	330	14,19	24,66	33,82	37,73	37,91	32,73
	28	250	14,21	24,69	33,88	37,79	37,97	32,77
	19	191	14,25	24,75	33,96	37,88	38,06	32,85
17	145	14,22	24,72	33,91	37,83	38	32,81	

Die zeitliche Entwicklung der Borkonzentration [‰] und der Leistung als Bruchteil der jeweiligen Maximalleistung der Proben SF95-1, SF96-1 und SF97-1 sind in Abb. 2.9 graphisch dargestellt.



**Abb. 2.9** Bestrahlungsgeschichte der Brennstäbe SF95-1, SF96-1, und SF97-1

Die relativen Leistungsgeschichten aller Proben eines Brennstabes verlaufen nahezu identisch. Aufgrund der unterschiedlichen axialen Höhen der Proben sind ihre jeweiligen absoluten Leistungswerte aber unterschiedlich. Aufgrund des Ausbrands des Neutronenabsorbers Gadolinium kommt es beim Stab SF96-1 zu einer starken Leistungszunahme innerhalb des ersten Zyklus. Für die Abbrandrechnungen wurde die Leistungsgeschichte für jedes Experiment mit einem konstanten Faktor so normiert, dass die Abweichung der berechneten zur gemessenen  $^{148}\text{Nd}$ -Konzentration als Abbrandindikator minimiert wird.

Die isotopenaufgelösten Zusammensetzungen der Proben wurden mithilfe zerstörender Analysemethoden ermittelt. Die gefundenen Konzentrationen werden in /MIC 17/ in Gramm pro Tonne anfänglichem Schwermetall (g/tSMi) für alle Isotope bei Reaktorabschaltung angegeben. Dabei ist der Wert für  $^{239}\text{Pu}$  die Summe aus  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{239}\text{Np}$ . Für die Proben des Brennstabes SF95 sind die gemessenen Werte in Tab. 2.28 gezeigt, für die Proben des Brennstabes SF96 in Tab. 2.29 und für die Proben des Brennstabes SF97 in Tab. 2.30.

**Tab. 2.28** Nuklidzusammensetzung aller gemessener Nuklide zur Reaktorabschaltung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennstabs SF95

Isotop	SF95-1	SF95-2	SF95-3	SF95-4	SF95-5
<sup>234</sup> U	2,987E+02	2,850E+02	1,873E+02	1,870E+02	2,829E+02
<sup>235</sup> U	2,674E+04	1,927E+04	1,326E+04	1,230E+04	1,544E+04
<sup>236</sup> U	2,672E+03	4,024E+03	4,911E+03	4,999E+03	4,566E+03
<sup>238</sup> U	9,499E+05	9,424E+05	9,338E+05	9,335E+05	9,388E+05
<sup>238</sup> Pu	1,718E+01	7,102E+01	1,539E+02	1,588E+02	1,020E+02
<sup>239</sup> Pu	4,227E+03	5,655E+03	6,194E+03	6,005E+03	5,635E+03
<sup>240</sup> Pu	7,802E+02	1,539E+03	2,186E+03	2,207E+03	1,821E+03
<sup>241</sup> Pu	3,690E+02	9,578E+02	1,486E+03	1,466E+03	1,153E+03
<sup>242</sup> Pu	3,790E+01	1,844E+02	4,516E+02	4,803E+02	2,976E+02
<sup>241</sup> Am	1,378E+01	2,344E+01	3,310E+01	2,351E+01	2,840E+01
<sup>242m1</sup> Am	1,840E-01	5,201E-01	7,877E-01	7,282E-01	5,687E-01
<sup>243</sup> Am	2,682E+00	2,289E+01	8,047E+01	8,472E+01	4,400E+01
<sup>242</sup> Cm	1,510E+00	7,672E+00	1,964E+01	2,328E+01	1,006E+01
<sup>243</sup> Cm	1,451E-02	1,240E-01	3,720E-01	3,976E-01	2,293E-01
<sup>244</sup> Cm	2,712E-01	5,042E+00	2,562E+01	2,837E+01	1,064E+01
<sup>245</sup> Cm	5,519E-03	1,962E-01	1,396E+00	1,587E+00	4,839E-01
<sup>246</sup> Cm	2,560E-04	1,190E-02	1,049E-01	1,251E-01	1,952E-02
<sup>106</sup> Ru	4,447E+01	8,340E+01	1,360E+02	1,401E+02	1,208E+02
<sup>125</sup> Sb	1,471E+00	2,900E+00	3,733E+00	3,169E+00	3,262E+00
<sup>134</sup> Cs	2,343E+01	7,012E+01	1,404E+02	1,471E+02	1,014E+02
<sup>137</sup> Cs	5,405E+02	9,336E+02	1,347E+03	1,400E+03	1,148E+03
<sup>144</sup> Ce	1,937E+02	3,160E+02	4,560E+02	4,301E+02	3,868E+02
<sup>154</sup> Eu	4,093E+00	1,306E+01	2,525E+01	2,657E+01	1,817E+01
<sup>142</sup> Nd	4,631E+02	7,149E+02	9,299E+02	9,373E+02	8,303E+02
<sup>143</sup> Nd	3,276E+02	6,046E+02	9,347E+02	1,024E+03	7,928E+02
<sup>144</sup> Nd	3,328E+02	5,384E+02	7,392E+02	7,598E+02	6,518E+02
<sup>145</sup> Nd	2,809E+02	4,925E+02	7,340E+02	7,624E+02	6,185E+02
<sup>146</sup> Nd	1,592E+02	2,736E+02	3,979E+02	4,126E+02	3,401E+02
<sup>148</sup> Nd	7,200E+01	1,258E+02	1,896E+02	1,959E+02	1,572E+02
<sup>150</sup> Nd	4,631E+02	7,149E+02	9,299E+02	9,373E+02	8,303E+02

**Tab. 2.29** Nuklidzusammensetzung aller gemessener Nuklide zur Reaktorabschaltung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennstabs SF96

Isotop	SF96-1	SF96-2	SF96-3	SF96-4	SF96-5
<sup>234</sup> U	1,805E+02	1,522E+02	1,251E+02	1,250E+02	1,354E+02
<sup>235</sup> U	1,944E+04	1,408E+04	8,638E+03	8,064E+03	9,937E+03
<sup>236</sup> U	1,421E+03	2,411E+03	3,244E+03	3,302E+03	3,013E+03
<sup>238</sup> U	9,660E+05	9,580E+05	9,476E+05	9,475E+05	9,522E+05
<sup>238</sup> Pu	8,536E+00	4,172E+01	1,206E+02	1,248E+02	7,978E+01
<sup>239</sup> Pu	6,764E+02	5,459E+03	6,001E+03	5,819E+03	5,519E+03
<sup>240</sup> Pu	3,781E+03	1,494E+03	2,303E+03	2,327E+03	1,964E+03
<sup>241</sup> Pu	2,622E+02	8,684E+02	1,498E+03	1,480E+03	1,203E+03
<sup>242</sup> Pu	2,440E+01	1,615E+02	5,103E+02	5,411E+02	3,551E+02
<sup>237</sup> Np	6,125E+01	1,323E+02	2,168E+02	2,252E+02	1,875E+02
<sup>241</sup> Am	5,985E+00	1,735E+01	2,845E+01	3,094E+01	2,149E+01
<sup>242m1</sup> Am	1,218E-01	4,579E-01	6,413E-01	6,793E-01	5,647E-01
<sup>243</sup> Am	1,147E+00	1,728E+01	8,872E+01	9,598E+01	5,078E+01
<sup>242</sup> Cm	8,502E-01	5,781E+00	1,628E+01	1,679E+01	1,115E+01
<sup>244</sup> Cm	9,560E-02	3,092E+00	2,862E+01	3,128E+01	1,280E+01
<sup>106</sup> Ru	2,830E+01	6,053E+01	1,402E+02	1,291E+02	1,344E+02
<sup>125</sup> Sb	1,433E+00	2,829E+00	3,658E+00	4,645E+00	3,690E+00
<sup>134</sup> Cs	8,609E+00	3,759E+01	1,002E+02	1,047E+02	7,146E+01
<sup>137</sup> Cs	2,813E+02	5,983E+02	1,018E+03	1,053E+03	8,572E+02
<sup>144</sup> Ce	1,179E+02	2,250E+02	3,362E+02	3,453E+02	3,145E+02
<sup>154</sup> Eu	2,309E+00	8,538E+00	1,973E+01	1,992E+01	1,423E+01
<sup>143</sup> Nd	2,521E+02	4,778E+02	7,158E+02	7,184E+02	6,433E+02
<sup>144</sup> Nd	1,536E+02	3,588E+02	7,292E+02	7,513E+02	5,927E+02
<sup>145</sup> Nd	1,800E+02	3,575E+02	5,766E+02	5,880E+02	5,095E+02
<sup>146</sup> Nd	1,536E+02	3,266E+02	5,795E+02	5,948E+02	4,910E+02
<sup>148</sup> Nd	8,770E+01	1,851E+02	3,201E+02	3,280E+02	2,733E+02
<sup>150</sup> Nd	4,130E+01	8,972E+01	1,591E+02	1,628E+02	1,331E+02

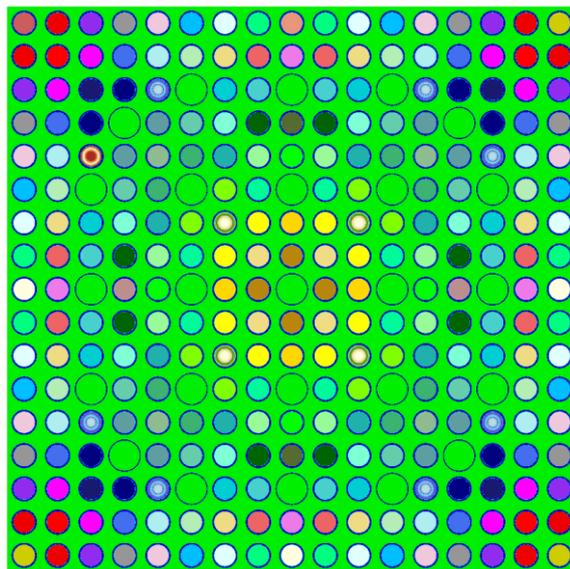
**Tab. 2.30** Nuklidzusammensetzung aller gemessener Nuklide zur Reaktorabschaltung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennstabs SF97

Isotop	SF97-1	SF97-2	SF97-3	SF97-4	SF97-5	SF97-6
<sup>234</sup> U	2,939E+02	2,348E+02	2,010E+02	1,872E+02	1,865E+02	2,057E+02
<sup>235</sup> U	2,347E+04	1,571E+04	1,030E+04	8,179E+03	7,932E+03	1,016E+04
<sup>236</sup> U	3,115E+03	4,560E+03	5,312E+03	5,528E+03	5,532E+03	5,272E+03
<sup>238</sup> U	9,493E+05	9,377E+05	9,282E+05	9,246E+05	9,247E+05	9,310E+05
<sup>238</sup> Pu	2,370E+01	1,250E+02	2,581E+02	3,199E+02	3,188E+02	2,175E+02
<sup>239</sup> Pu	3,844E+03	5,928E+03	6,217E+03	6,037E+03	5,976E+03	5,677E+03
<sup>240</sup> Pu	9,347E+02	1,871E+03	2,471E+03	2,668E+03	2,648E+03	2,326E+03
<sup>241</sup> Pu	4,237E+02	1,235E+03	1,689E+03	1,770E+03	1,754E+03	1,494E+03
<sup>242</sup> Pu	6,185E+01	3,152E+02	6,517E+02	8,246E+02	8,341E+02	5,977E+02
<sup>237</sup> Np	1,521E+02	4,034E+02	5,845E+02	6,604E+02	6,701E+02	5,570E+02
<sup>241</sup> Am	1,492E+01	4,017E+01	4,909E+01	5,311E+01	5,327E+01	4,297E+01
<sup>242m1</sup> Am	2,270E-01	8,838E-01	1,179E+00	1,233E+00	1,200E+00	9,756E-01
<sup>243</sup> Am	4,448E+00	5,132E+01	1,410E+02	1,924E+02	1,935E+02	1,170E+02
<sup>242</sup> Cm	2,134E+00	1,049E+01	1,839E+01	2,044E+01	1,903E+01	1,616E+01
<sup>243</sup> Cm	2,483E-02	2,773E-01	6,921E-01	8,721E-01	8,670E-01	5,600E-01
<sup>244</sup> Cm	4,981E-01	1,384E+01	5,696E+01	8,810E+01	8,823E+01	4,221E+01
<sup>245</sup> Cm	1,087E-02	6,848E-01	3,735E+00	6,042E+00	5,915E+00	2,363E+00
<sup>246</sup> Cm	3,866E-04	4,222E-02	3,648E-01	7,440E-01	7,549E-01	2,481E-01
<sup>247</sup> Cm	0,000E+00	4,043E-04	4,974E-03	1,098E-02	1,075E-02	3,139E-03
<sup>106</sup> Ru	5,163E+01	1,162E+02	1,829E+02	1,936E+02	1,162E+02	1,959E+02
<sup>125</sup> Sb	2,462E+00	5,118E+00	4,966E+00	6,090E+00	7,507E+00	4,546E+00
<sup>134</sup> Cs	2,983E+01	1,030E+02	1,829E+02	2,139E+02	2,144E+02	1,632E+02
<sup>137</sup> Cs	6,617E+02	1,151E+03	1,582E+03	1,749E+03	1,761E+03	1,531E+03
<sup>144</sup> Ce	2,026E+02	3,061E+02	3,720E+02	3,756E+02	3,750E+02	3,714E+02
<sup>154</sup> Eu	5,253E+00	1,973E+01	3,293E+01	3,739E+01	3,707E+01	2,859E+01
<sup>143</sup> Nd	5,450E+02	8,307E+02	1,008E+03	1,048E+03	1,049E+03	9,736E+02
<sup>144</sup> Nd	4,661E+02	8,843E+02	1,331E+03	1,567E+03	1,599E+03	1,311E+03
<sup>145</sup> Nd	4,045E+02	6,480E+02	8,387E+02	9,118E+02	9,179E+02	8,247E+02
<sup>146</sup> Nd	3,502E+02	6,304E+02	8,929E+02	1,008E+03	1,014E+03	8,586E+02
<sup>148</sup> Nd	1,945E+02	3,389E+02	4,662E+02	5,204E+02	5,226E+02	4,504E+02
<sup>150</sup> Nd	8,570E+01	1,582E+02	2,234E+02	2,516E+02	2,518E+02	2,130E+02
<sup>147</sup> Sm	1,529E+02	2,050E+02	2,355E+02	2,468E+02	2,479E+02	2,371E+02
<sup>148</sup> Sm	4,092E+01	1,194E+02	1,978E+02	2,338E+02	2,357E+02	1,809E+02
<sup>149</sup> Sm	2,935E+00	3,976E+00	4,259E+00	3,943E+00	3,799E+00	3,843E+00

Isotop	SF97-1	SF97-2	SF97-3	SF97-4	SF97-5	SF97-6
<sup>150</sup> Sm	1,323E+02	2,499E+02	3,599E+02	4,074E+02	4,113E+02	3,409E+02
<sup>151</sup> Sm	9,324E+00	1,351E+01	1,503E+01	1,491E+01	1,465E+01	1,294E+01
<sup>152</sup> Sm	6,526E+01	9,546E+01	1,191E+02	1,298E+02	1,319E+02	1,207E+02
<sup>154</sup> Sm	1,425E+01	2,977E+01	4,536E+01	5,252E+01	5,298E+01	4,231E+01

## 2.2.2 Modellierung

Die Modellierung erfolgte gemäß den in Abschnitt 2.1 erläuterten Grundsätzen. Abb. 2.10 zeigt das Brennelement in KENO-VI-Geometrie. Für beide analysierten Brennelemente sind die Modelle identisch. Die gadoliniumhaltigen Brennstäbe wurden für die Berechnung in 10 Ringzonen mit gleicher Fläche unterteilt, um den aufgrund der Neutronenselbstabschirmung radial variierenden Gadoliniumabbrand genauer berechnen zu können.



**Abb. 2.10** Geometrie-Modell der Brennelemente der Takahama-3 Proben

Die Brennstäbe wurden wie in den experimentellen Daten angegeben mit einem heliumgefüllten Zwischenraum zwischen Brennstoff und Hüllrohr modelliert (Kernzahldichte =  $2,4044E-04$  1/cm<sup>3</sup>). Die geometrischen Abmessungen und Materialdaten wurden wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben übernommen. Die Parameter der Abbrandrechnungen sind in Tab. 2.13 wiedergegeben. Die Liste der ausgegebenen Nuklide ist in Tab. 2.31 dargestellt.

**Tab. 2.31** Liste der betrachteten Nuklide

Betrachtete Nuklide						
<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>238</sup> U			
<sup>237</sup> Np <sup>1</sup>	<sup>239</sup> Np					
<sup>238</sup> Pu	<sup>239</sup> Pu	<sup>240</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu	<sup>242</sup> Pu		
<sup>241</sup> Am	<sup>242m1</sup> Am	<sup>243</sup> Am				
<sup>242</sup> Cm	<sup>243</sup> Cm <sup>2</sup>	<sup>244</sup> Cm	<sup>245</sup> Cm <sup>2</sup>	<sup>246</sup> Cm <sup>2</sup>	<sup>247</sup> Cm <sup>3</sup>	
<sup>142</sup> Nd <sup>4</sup>	<sup>143</sup> Nd	<sup>144</sup> Nd	<sup>145</sup> Nd	<sup>146</sup> Nd	<sup>148</sup> Nd	<sup>150</sup> Nd
<sup>106</sup> Ru		<sup>125</sup> Sb				
<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs					
<sup>144</sup> Ce	<sup>154</sup> Eu					
<sup>154</sup> Gd <sup>5</sup>	<sup>155</sup> Gd <sup>5</sup>	<sup>156</sup> Gd <sup>5</sup>	<sup>157</sup> Gd <sup>5</sup>	<sup>158</sup> Gd <sup>5</sup>	<sup>160</sup> Gd <sup>5</sup>	
<sup>147</sup> Sm <sup>3</sup>	<sup>148</sup> Sm <sup>3</sup>	<sup>149</sup> Sm <sup>3</sup>	<sup>150</sup> Sm <sup>3</sup>	<sup>151</sup> Sm <sup>3</sup>	<sup>152</sup> Sm <sup>3</sup>	<sup>154</sup> Sm <sup>3</sup>

### 2.2.3 Resultate

Die Ergebnisse der Nachrechnungen sind in Tab. 2.32 und Tab. 2.33 sowie in Abb. 2.11 bis Abb. 2.16 dargestellt. Für die Validierung wurden die Proben SF95-1, SF96-1 und SF97-1 nicht berücksichtigt, da diese dicht am oberen Ende des Brennelements entnommen wurden. Hier ist die quasi-zweidimensionale Näherung reflektierender Randbedingungen in z-Richtung nicht mehr geeignet, so dass die Nachrechnung dieser Proben eine dreidimensionale Modellierung erfordert, um realistische Ergebnisse zu erhalten /KIL 08a/. Die dazu notwendigen Informationen liegen jedoch nicht in einer für eine Validierung erforderlichen Detailtiefe vor. Um die Darstellung der Nuklide mit geringem Unterschied zwischen Rechnung und Experiment zu verbessern wurden die Skalen der Balkendiagramme so gewählt, dass einige Nuklide mit großen Abweichungen nicht mehr im Anzeige Bereich sind. Die C/E-1-Werte zu diesen Nukliden sind in den Tabellen ablesbar. Weiterhin ist zu beachten, dass für die verschiedenen Diagramme unterschiedliche Skalen aufweisen.

---

<sup>1</sup> Nur für SF-96 und SF-97

<sup>2</sup> Nur für SF-95 und SF-97

<sup>3</sup> Nur für SF-97

<sup>4</sup> Nur für SF-95

<sup>5</sup> Nur für SF-96

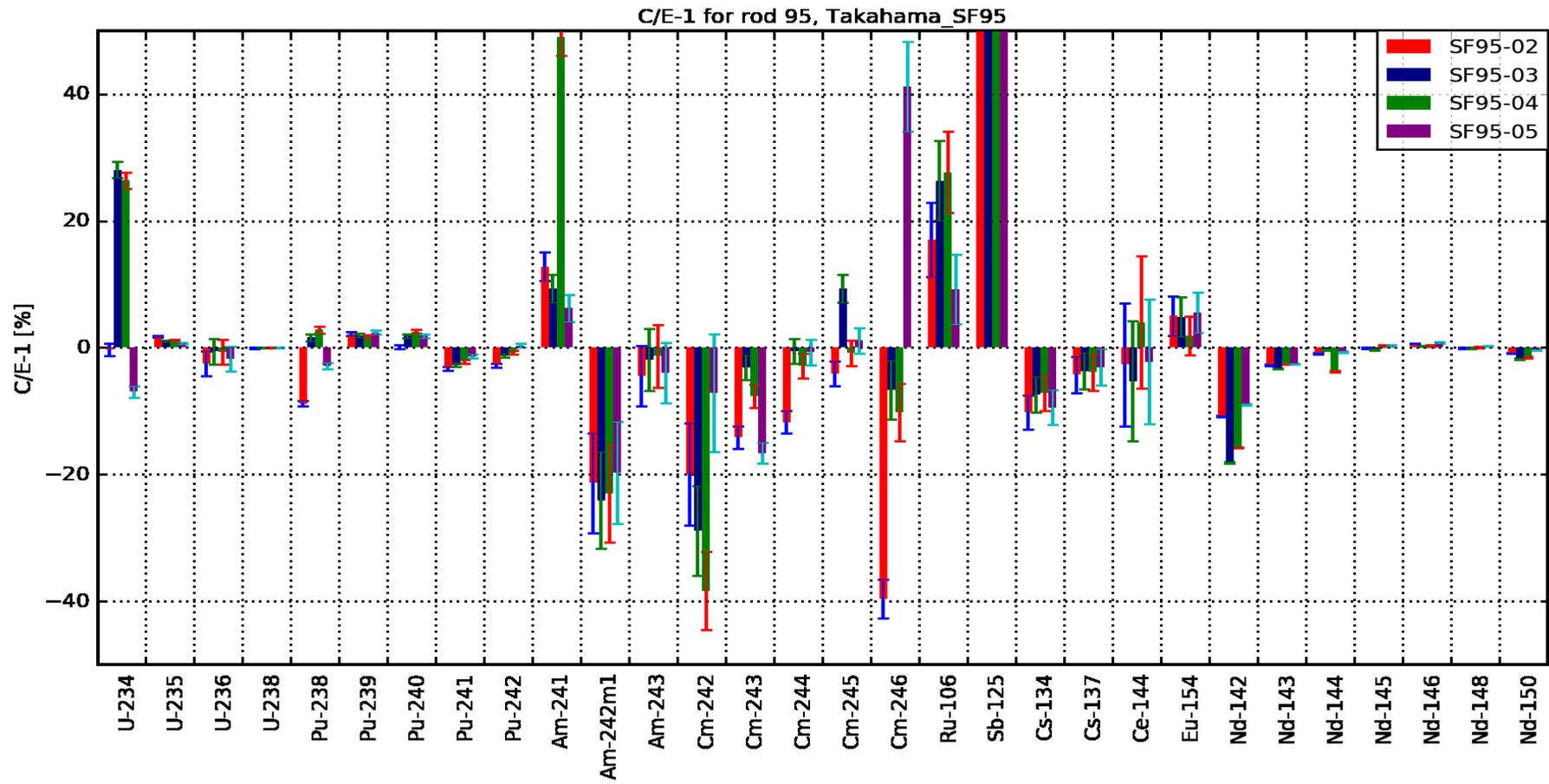
Insgesamt zeigen sich für die Takahama-Proben gute Übereinstimmungen für die Uran- und Plutonium-Isotope. Insbesondere die Werte für  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  liegen im Mittel deutlich unter fünf Prozent. Bei den höheren Aktinoiden fällt zum einen die große Streubreite der Ergebnisse für  $^{237}\text{Np}$  auf, die auf eine mögliche Unterschätzung der Messunsicherheit hindeutet, und zum anderen die guten Übereinstimmungen für einige Am- und Cm-Nuklide bei den Proben der Stäbe SF95 und SF96. Die typische rechnerische Unterschätzung der Am- und Cm-Nuklide, die auch bei den Proben des Stabs SF97 zu erkennen ist, fällt hier deutlich geringer als bei anderen Probennachrechnungen aus.

**Tab. 2.32** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %  
für die Stäbe SF95 und SF96

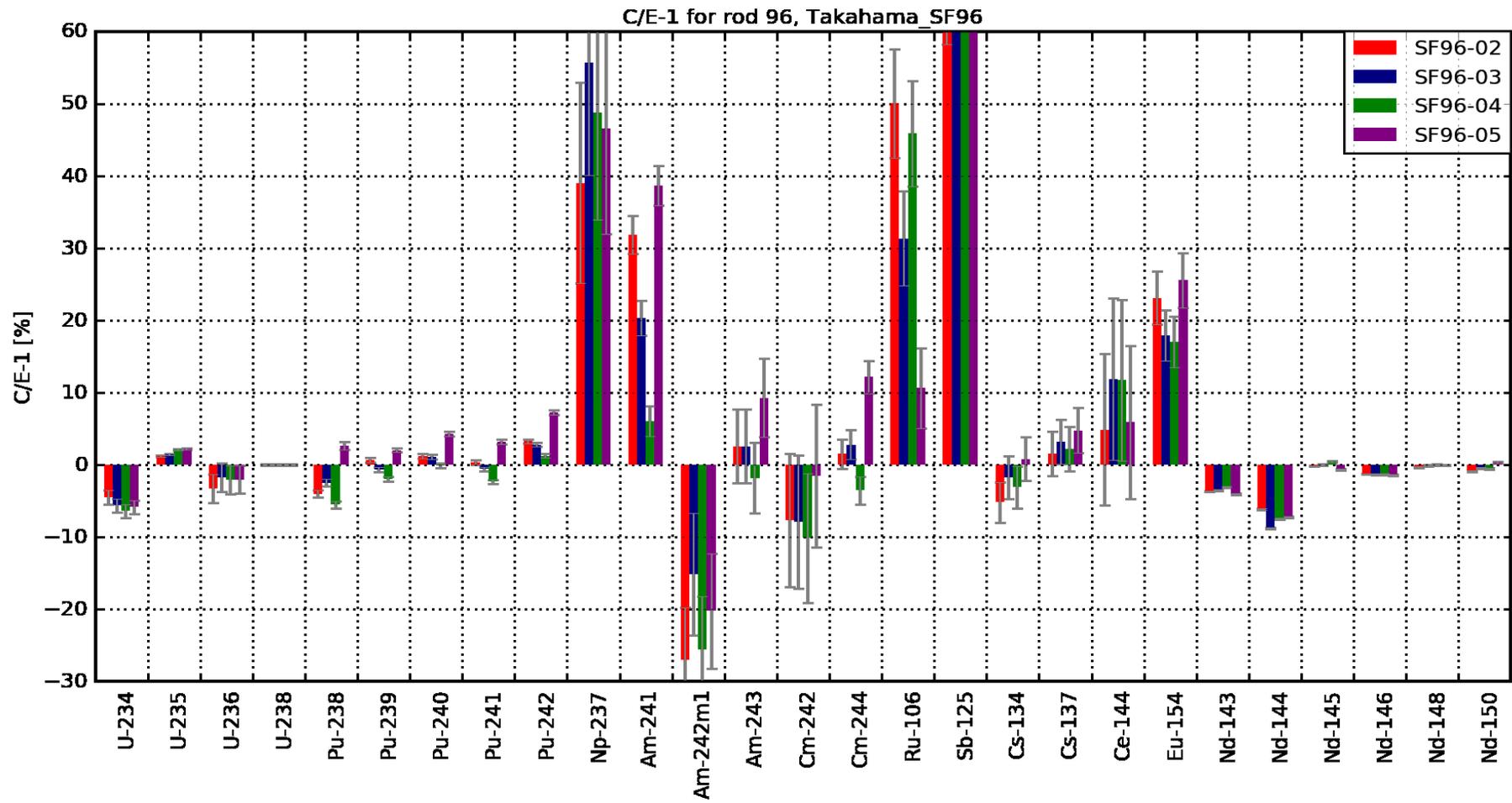
	SF95-02	SF95-03	SF95-04	SF95-05	SF96-02	SF96-03	SF96-04	SF96-05
<sup>234</sup> U	-0.3	28.0	26.4	-7.0	-4.5	-5.6	-6.4	-5.9
<sup>235</sup> U	1.7	1.0	1.2	0.6	1.2	1.5	2.0	2.2
<sup>236</sup> U	-2.6	-0.6	-0.7	-1.8	-3.3	-1.8	-2.1	-2.0
<sup>238</sup> U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<sup>237</sup> Np	-	-	-	-	39.0	55.7	48.8	46.6
<sup>238</sup> Pu	-8.8	1.6	2.8	-2.8	-4.0	-2.5	-5.5	2.6
<sup>239</sup> Pu	2.2	1.9	1.7	2.4	0.7	-0.6	-2.0	2.0
<sup>240</sup> Pu	0.1	1.8	2.5	1.9	1.2	1.1	-0.1	4.3
<sup>241</sup> Pu	-3.3	-2.7	-2.2	-1.4	0.3	-0.6	-2.3	3.2
<sup>242</sup> Pu	-2.8	-1.3	-0.8	0.3	3.3	2.8	1.3	7.2
<sup>241</sup> Am	12.8	9.3	49.0	6.2	31.8	20.3	6.0	38.7
<sup>242m1</sup> Am	-21.3	-24.1	-23.0	-19.7	-27.0	-15.1	-25.6	-20.2
<sup>243</sup> Am	-4.5	-1.9	-1.3	-4.0	2.6	2.5	-1.8	9.3
<sup>242</sup> Cm	-20.0	-28.9	-38.3	-7.2	-7.7	-7.9	-10.1	-1.5
<sup>243</sup> Cm	-14.2	-3.1	-7.6	-16.6	-	-	-	-
<sup>244</sup> Cm	-11.7	-0.6	-2.9	-0.7	1.5	2.8	-3.5	12.2
<sup>245</sup> Cm	-4.1	9.3	-0.9	1.1	-	-	-	-
<sup>246</sup> Cm	-39.6	-6.7	-10.2	41.2	-	-	-	-
<sup>106</sup> Ru	17.0	26.3	27.7	9.2	50.0	31.3	45.9	10.6
<sup>125</sup> Sb	110.2	153.3	208.2	137.1	75.8	144.8	96.1	103.1
<sup>134</sup> Cs	-10.2	-7.4	-7.1	-9.4	-5.2	-1.8	-3.1	0.8
<sup>137</sup> Cs	-4.3	-3.7	-3.9	-3.1	1.5	3.2	2.2	4.8
<sup>144</sup> Cs	-2.7	-5.3	4.0	-2.2	4.9	11.8	11.7	5.9
<sup>154</sup> Eu	5.0	4.8	1.9	5.6	23.1	17.9	17.0	25.5
<sup>142</sup> Nd	-10.8	-18.1	-15.7	-9.0				
<sup>143</sup> Nd	-2.7	-3.3	-2.6	-2.6	-3.7	-3.5	-3.1	-4.1
<sup>144</sup> Nd	-0.9	-0.3	-3.8	-0.7	-6.2	-8.8	-7.5	-7.3
<sup>145</sup> Nd	-0.1	-0.3	0.3	0.3	-0.2	0.0	0.4	-0.6
<sup>146</sup> Nd	0.6	0.2	0.3	0.8	-1.3	-1.4	-1.3	-1.4
<sup>148</sup> Nd	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.3	-0.1	0.0	-0.1
<sup>150</sup> Nd	-0.9	-1.8	-1.5	-0.4	-0.9	-0.5	-0.5	0.3

**Tab. 2.33** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %

	SF97-02	SF97-03	SF97-04	SF97-05	SF97-06
<sup>234</sup> U	10.9	8.6	7.6	8.9	9.9
<sup>235</sup> U	0.7	0.3	-0.6	-1.6	1.0
<sup>236</sup> U	-1.4	-0.6	-0.7	-0.7	-1.4
<sup>238</sup> U	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
<sup>237</sup> Np	-4.9	-3.5	-5.1	-7.4	-7.6
<sup>238</sup> Pu	-7.5	-6.3	-8.0	-10.4	-7.2
<sup>239</sup> Pu	-1.0	-0.6	-2.2	-4.2	0.1
<sup>240</sup> Pu	2.6	3.5	2.9	2.0	3.5
<sup>241</sup> Pu	-6.4	-5.0	-6.4	-8.2	-5.3
<sup>242</sup> Pu	-3.2	-2.4	-3.1	-3.8	-4.2
<sup>241</sup> Am	16.7	21.8	-1.5	-5.2	14.9
<sup>242m1</sup> Am	-14.5	-17.1	-32.0	-34.7	-22.6
<sup>243</sup> Am	-10.8	-8.5	-10.8	-12.2	-9.5
<sup>242</sup> Cm	12.5	12.6	23.3	30.1	17.6
<sup>243</sup> Cm	-10.0	-8.8	-6.8	-9.3	-8.1
<sup>244</sup> Cm	-13.2	-10.2	-13.6	-16.4	-11.0
<sup>245</sup> Cm	-13.2	-7.1	-11.8	-17.6	-8.0
<sup>246</sup> Cm	-24.9	-19.4	-23.3	-26.4	-21.6
<sup>247</sup> Cm	-33.8	-27.4	-31.2	-32.8	-34.3
<sup>106</sup> Ru	-8.6	-8.4	5.8	76.2	-17.9
<sup>125</sup> Sb	35.1	101.1	87.9	52.2	109.2
<sup>134</sup> Cs	-16.8	-13.8	-9.6	-9.6	-11.6
<sup>137</sup> Cs	-4.7	-4.6	-3.6	-3.9	-4.9
<sup>144</sup> Ce	-12.3	-9.0	4.7	5.3	-6.5
<sup>154</sup> Eu	0.5	1.4	-0.1	-1.0	3.2
<sup>143</sup> Nd	-1.6	-1.7	-1.7	-2.6	-1.9
<sup>144</sup> Nd	0.7	-0.9	-3.7	-4.2	-2.7
<sup>145</sup> Nd	0.5	0.6	0.9	0.8	0.2
<sup>146</sup> Nd	-0.9	-1.2	-1.2	-1.4	-1.4
<sup>148</sup> Nd	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1
<sup>150</sup> Nd	-0.5	-0.2	-0.4	-0.4	-0.2
<sup>147</sup> Sm	3.8	3.7	2.1	2.7	3.3
<sup>148</sup> Sm	-7.0	-7.8	-8.8	-9.9	-6.9
<sup>149</sup> Sm	-13.5	-9.3	-3.6	-2.5	-10.9
<sup>150</sup> Sm	1.2	0.8	0.2	-0.8	1.3
<sup>151</sup> Sm	-5.8	-6.7	-8.4	-11.3	-5.8
<sup>152</sup> Sm	3.3	2.2	2.5	2.9	2.4
<sup>154</sup> Sm	-1.0	1.0	0.8	-0.3	0.5



**Abb. 2.11** Takahama-3, SF95: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent



**Abb. 2.12** Takahama-3, SF96: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

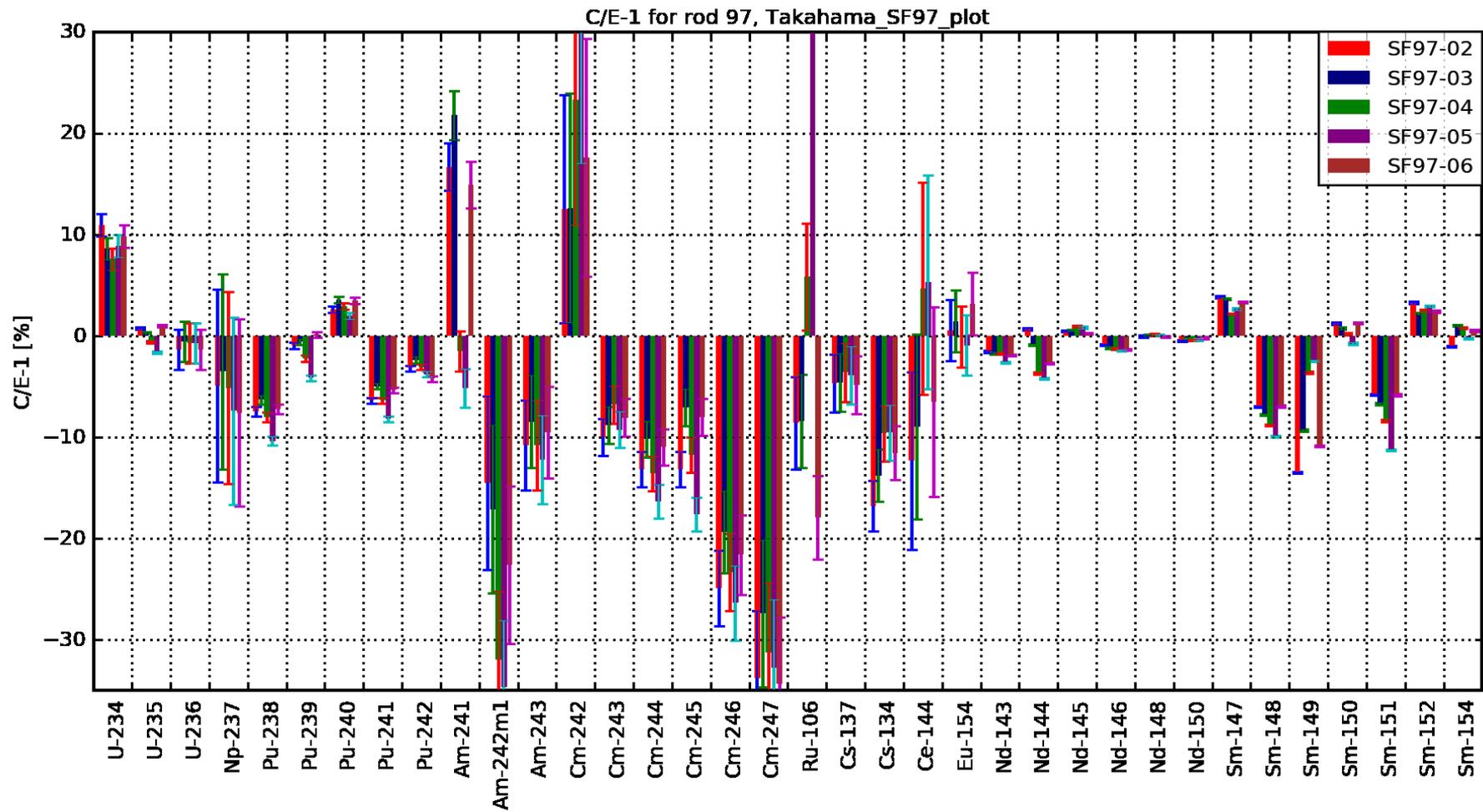


Abb. 2.13 Takahama-3, SF97: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

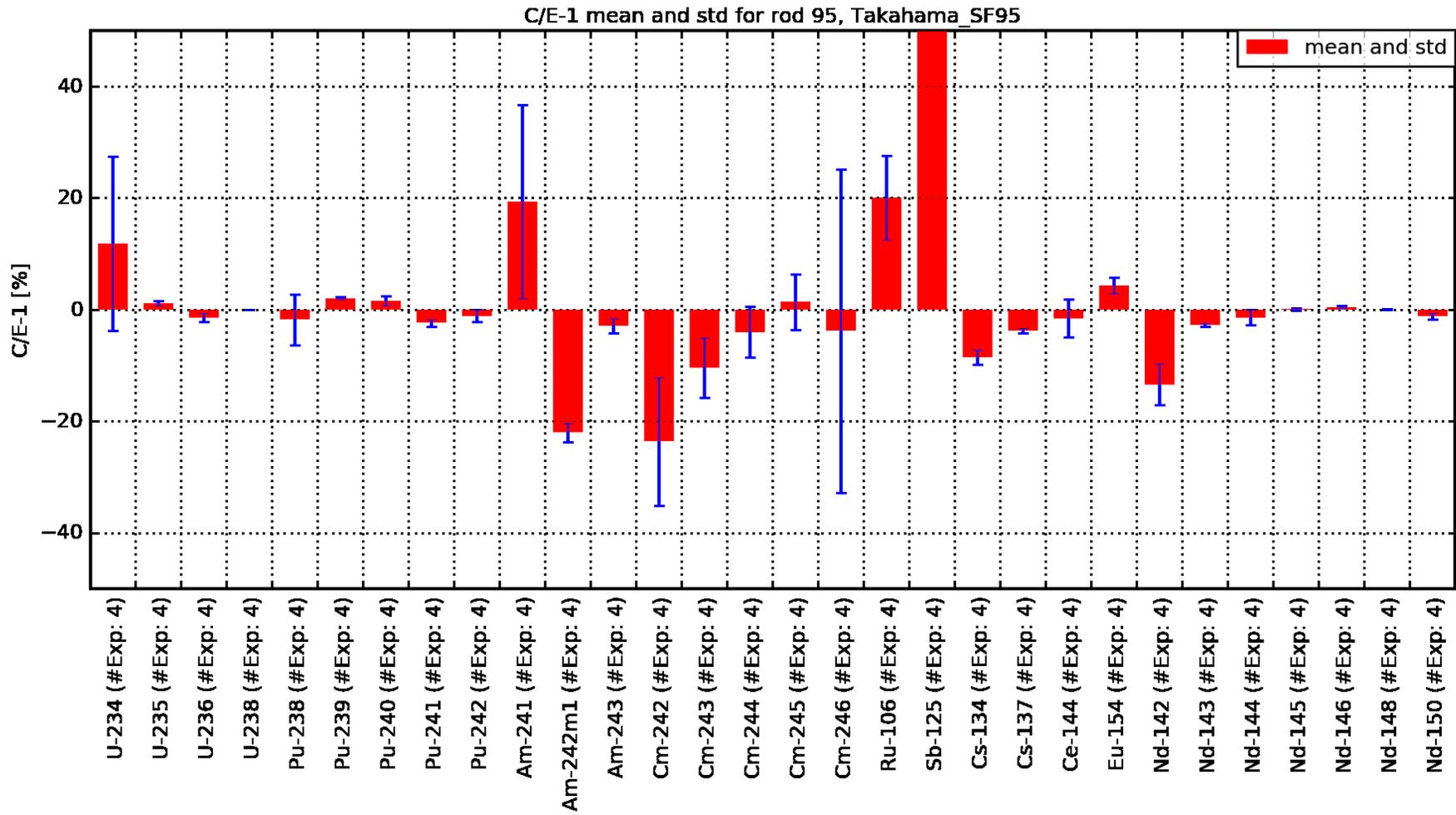


Abb. 2.14 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben SF95-2 bis SF95-5

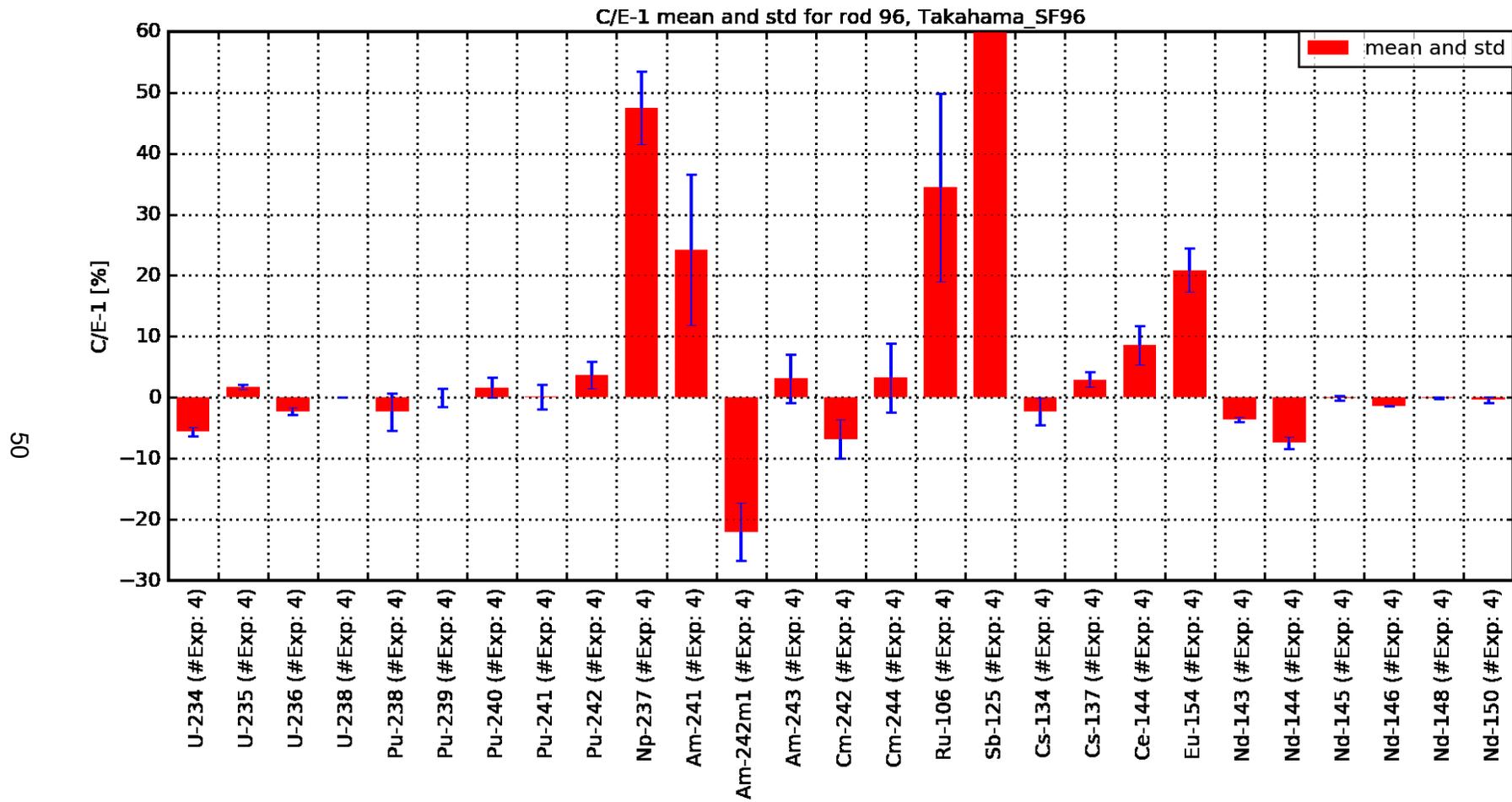


Abb. 2.15 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben SF96-2 bis SF96-5

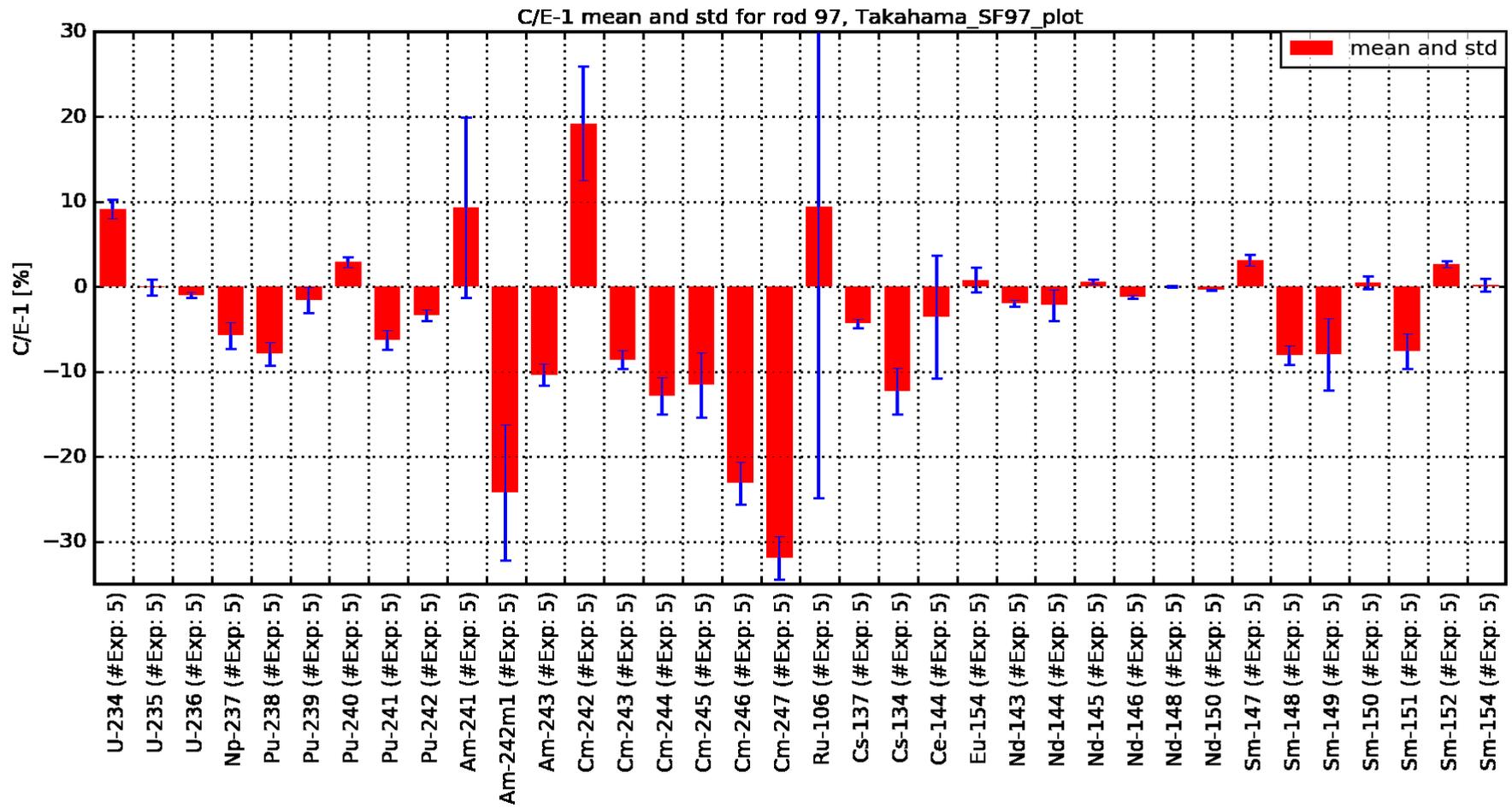


Abb. 2.16 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben SF97-2 bis SF97-6

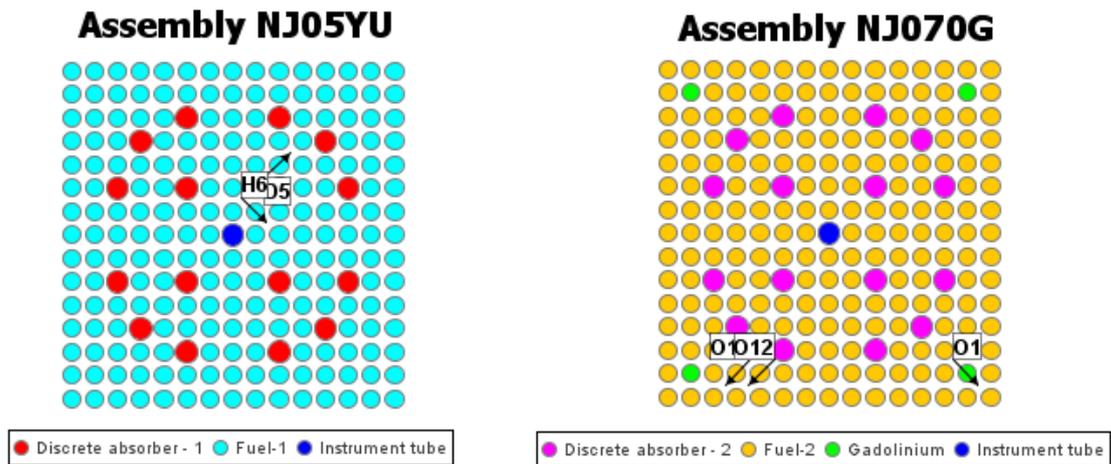
Für die Spaltprodukte ergibt sich, abgesehen v. a. von den bereits bei den Ohi-Proben beobachteten starken Abweichungen bei  $^{125}\text{Sb}$ , insgesamt eine gute Übereinstimmung. In den meisten Fällen stimmen Rechnung und Messung im Rahmen der Messunsicherheit überein. Es gibt allerdings einige Ausnahmen die im Folgenden kurz dargestellt werden: Während für die Nd-Nuklide häufig nur sehr geringe Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment zu beobachten sind, sind die angegebenen Messfehler von 0,1 % so klein, dass eine Übereinstimmung im Rahmen der Messgenauigkeit nicht festgestellt werden kann. Für einige Proben aus SF95 und SF97 wird die Konzentration von  $^{134}\text{Cs}$  von der Rechnung deutlich unterschätzt, während bei SF96 eine gute Übereinstimmung vorliegt. Bei  $^{106}\text{Ru}$  ist eine große Streuung der C/E-1-Werte zu beobachten. Schließlich ist bei den Samarium-Nukliden, mit Ausnahme von  $^{150}\text{Sm}$  und  $^{154}\text{Sm}$ , eine signifikante Abweichung zwischen Rechnung und Messung zu beobachten.

## **2.3 Proben des Reaktors Three Mile Island-1**

Aus dem Druckwasserreaktor Three Mile Island (TMI), Unit 1 des Herstellers Babcock & Wilcox, der von der amerikanischen Energieversorgers Exelon betrieben wird, wurden insgesamt 24 Nachbestrahlungsanalyseproben aus fünf Brennstäben aus zwei Brennelemente (NJ05YU und NJ070G) untersucht. Die Brennelemente wurden für zwei Zyklen bzw. einen Zyklus bestrahlt. TMI Unit 1 hat eine thermische Leistung von 2568 MW und verwendet ein Babcock & Wilcox 15 x 15-Brennelement-Design, teilweise mit gadoliniumhaltigen Brennstäben. Die Angaben zu Brennelementgeometrien, Materialdaten und Abbrandhistorien stammen vorwiegend aus der Datenbank SFCOMPO /MIC 17/ und wurden teilweise durch Informationen aus den Veröffentlichungen /BEC 02/, /WIM 01/, und /ILA 10/ ergänzt.

### **2.3.1 Experimentelle Daten**

Bei beiden Brennelementen handelt es sich um 15 x 15 DWR Brennelemente mit 16 Führungsrohren und einem Instrumentierungsrohr. In den Führungsrohren des Brennelements NJ070G und im ersten Zyklus auch des Brennelements NJ05YU sind borcarbidhaltige Absorberstäbe eingefahren. Das Brennelement NJ070G hat zusätzlich vier Brennstäbe mit dem abbrennbaren Neutronenabsorber  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . In Abb. 2.17 ist die schematische Darstellung der zwei Brennelemente mit den unterschiedlichen Brennstäben farblich kodiert dargestellt.



**Abb. 2.17** Schematische Darstellung der Brennelemente NJ05YU und NJ070G aus TMI-1

Aus dem Brennelement NJ05YU (Zyklus 9 und 10, Mark-B8V Brennelement-Typ) wurden aus dem Brennstab D5 drei Proben und aus dem Brennstab H6 13 Proben entnommen. Aus dem Brennelement NJ070G (Zyklus 10, Mark-B9 Brennelement Typ) wurden aus den Brennstäben O1 und O12 je drei Proben entnommen und aus dem Brennstab O13 zwei. Die Proben wurden jeweils bei unterschiedlichen axialen Höhen entnommen.

In Tab. 2.34 sind die relevanten gemeinsamen geometrischen Abmessungen der Brennelemente wiedergegeben, in Tab. 2.35 die relevanten geometrischen Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre. Details zu den einzelnen Proben finden sich in Tab. 2.36, Tab. 2.37 und Tab. 2.38. In Tab. 2.39 sind die Anreicherungen der Brennstäbe, der gadoliniumhaltigen Absorberstäbe und der borcarbidhaltigen Absorberstäbe wiedergegeben /MIC 17/.

**Tab. 2.34** Geometrische Abmessungen der Brennelemente NJ05YU und NJ070G

Parameter	NJ05YU	NJ070G
Gittertyp	15 x 15	15 x 15
Brennstababstand [cm]	1,44272	1,44272
Brennelementabstand [cm]	21,811	21,811
Brennstablänge [cm]	390,804	390,804
Aktive Brennstablänge [cm]	360,17	357,12
Anzahl BEs	208	208
Anzahl Führungsrohre	16	16
Anzahl Instrumentalrohre	1	1
Anzahl Bestrahlungszyklen	2	1
Bestrahlungsdauer [Tage] (Stillstandszeit [Tage])	666 (36) 692 (34)	692 (34)

**Tab. 2.35** Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre und Absorberstäbe

Parameter	
Durchmesser Brennstoff [cm]	0,936
Durchmesser innen Hüllrohr [cm]	0,958
Durchmesser außen Hüllrohr [cm]	1,092
Material Hüllrohr	Zircaloy-4
Dichte Hüllrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,56
Dichte Brennstoff [g/cm <sup>3</sup> ]	10,196
Durchmesser innen Führungsrohr [cm]	1,265
Durchmesser außen Führungsrohr [cm]	1,346
Material Führungsrohr	Zircaloy-4
Dichte Führungsrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,56
Durchmesser innen Instrumentalrohr [cm]	1,12
Durchmesser außen Instrumentalrohr [cm]	1,252
Material Instrumentalrohr	Zircaloy-4
Dichte Instrumentalrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,56
Durchmesser Absorber [cm]	0,864
Durchmesser innen Hüllrohr Absorber [cm]	0,914
Durchmesser außen Hüllrohr Absorber [cm]	1,092
Material Hüllrohr Absorber	Zircaloy-4

**Tab. 2.36** Relevante Details der Proben des Brennstabs D5 des Brennelements NJ05YU

Sample	A1	A2	B2
Probenabbrand [GWd/tSM]	45,9	55	52,4
Probenhöhe in Bezug auf die aktive Höhe [cm]	342,1	267,0	282,0

**Tab. 2.37** Relevante Details der Proben des Brennstabs H6 des Brennelements NJ05YU

Sample	A1B	A2	B1B	B2	B3J	C1
Probenabbrand [GWd/tSM]	44,8	50,6	54,5	50,1	53	50,2
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	38,735	74,676	155,956	115,062	77,013	235,458
Sample	C2B	C3	D1A2	D1A4	D2	
Probenabbrand [GWd/tSM]	52,6	51,3	55,7	50,5	44,8	
Probenhöhe in Bezug auf die aktive Höhe [cm]	194,615	156,21	261,899	292,379	322,072	

**Tab. 2.38** Relevante Details der Proben der Brennstäbe O1, O12, und O13 des Brennelements NJ070G

Brennstab	O1	O1	O1	O12	O12	O12	O13	O13
Sample	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Probenabbrand [GWd/tSM]	25,8	29,9	26,7	23,7	26,5	24	22,8	26,3
Probenhöhe in Bezug auf die aktive Höhe [cm]	39,37	197,104	278,13	39,37	197,104	278,13	39,37	197,104

**Tab. 2.39** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberbrennstäbe in [Gew.%]

BE	NJ05YU		NJ070G		
	Brennstäbe	Bor-Absorberstäbe	Brennstäbe	Bor-Absorberstäbe	Gd-Absorberstäbe
<sup>234</sup> U	0,04	-	0,045		-
<sup>235</sup> U	4,013	-	4,657		4,19
<sup>238</sup> U	95,947	-	95,298		95,981
<sup>nat</sup> B <sub>4</sub> C	-	1,7	-	2,1	-
<sup>nat</sup> Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	2

Die angegebenen Gewichtsprozent wurden für die Rechnung unter Berücksichtigung der Dichte des Brennstoffs in Kernzahldichten umgerechnet. Für den Gadoliniumvektor wurde in Ermangelung direkter Referenzen die Isotopenverteilung von Gadolinium angenommen, die in /SUY 11/ für den Ohi-2 Reaktor dokumentiert ist. Für natürliches Bor wird eine Verteilung auf <sup>10</sup>B und <sup>11</sup>B von 19,9 Gew% zu 80,1 Gew% und für <sup>12</sup>C zu <sup>13</sup>C von 98,9 Gew% zu 1,1 Gew% angenommen. Die berechneten Werte sind in Tab. 2.40 wiedergegeben. Nach /MIC 17/ bestehen alle Strukturmaterialien aus Zirkaloy-4. In /BEC 02/ ist die Zusammensetzung elementweise angegeben (nur für <sup>16</sup>O ist das Isotop spezifiziert). Mit den in Referenz /MAG 18/ angegebenen natürlichen Isotopenverhältnissen wurden hierfür die Kernzahldichten mit der angegebenen Dichte berechnet. Die verwendeten Werte sind in Tab. 2.41 wiedergegeben.

**Tab. 2.40** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberbrennstäbe in Kernzahldichten

<b>BE</b>	<b>NJ05YU</b>		<b>NJ070G</b>		
	<b>Brennstäbe</b>	<b>Bor-Absorberstäbe</b>	<b>Brennstäbe</b>	<b>Bor-Absorberstäbe</b>	<b>Gd-Absorberstäbe</b>
<sup>234</sup> U	9,2515E-06		1,0408E-05		0,0000E+00
<sup>235</sup> U	9,2420E-04		1,0725E-03		9,0894E-04
<sup>238</sup> U	2,1818E-02		2,1671E-02		2,1434E-02
<sup>10</sup> B		7,2875E-04		5,8994E-04	
<sup>11</sup> B		2,6666E-03		2,1587E-03	
<sup>12</sup> C		8,3828E-04		6,7861E-04	
<sup>13</sup> C		8,6065E-06		6,9672E-06	
<sup>27</sup> Al		4,2789E-02		4,2963E-02	
<sup>16</sup> O	4,5503E-02	6,4156E-02	4,5507E-02	6,4418E-02	4,5703E-02
<sup>17</sup> O		2,2954E-05		2,3048E-05	
<sup>152</sup> Gd					5,7216E-07
<sup>154</sup> Gd					6,4142E-06
<sup>155</sup> Gd					4,3906E-05
<sup>156</sup> Gd					6,1130E-05
<sup>157</sup> Gd					4,7037E-05
<sup>158</sup> Gd					7,5133E-05
<sup>160</sup> Gd					6,6942E-05

**Tab. 2.41** Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-4

Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]	Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kernzahl-dichten [1/barn*cm]		
Zr	98,23			Fe	0,21				
		<sup>90</sup> Zr	2,2584E-02			<sup>54</sup> Fe	8,9797E-06		
		<sup>91</sup> Zr	4,8708E-03			<sup>56</sup> Fe	1,3593E-04		
		<sup>92</sup> Zr	7,3642E-03			<sup>57</sup> Fe	3,0841E-06		
		<sup>94</sup> Zr	7,3042E-03			<sup>58</sup> Fe	4,0336E-07		
		<sup>96</sup> Zr	1,1522E-03						
Sn	1,45			Cr	0,1				
		<sup>112</sup> Sn	4,9610E-06			<sup>50</sup> Cr	3,4330E-06		
		<sup>114</sup> Sn	3,3163E-06			<sup>52</sup> Cr	6,3655E-05		
		<sup>115</sup> Sn	1,6936E-06			<sup>53</sup> Cr	7,0818E-06		
		<sup>116</sup> Sn	7,1800E-05	<sup>16</sup> O	0,125	<sup>54</sup> Cr	1,7302E-06	<sup>16</sup> O	3,0863E-04
		<sup>117</sup> Sn	3,7601E-05						
		<sup>118</sup> Sn	1,1757E-04						
		<sup>119</sup> Sn	4,1349E-05						
		<sup>120</sup> Sn	1,5552E-04						
		<sup>122</sup> Sn	2,1739E-05						
		<sup>124</sup> Sn	2,6747E-05						

/BEC 02/ gibt die Bestrahlungsgeschichte in Form von Bor-Konzentration und nodaler Leistung der Proben an. Die verwendeten Werte für die Proben aus Brennstab D5 aus dem Brennelement NJ06YU sind in Tab. 2.42 in MW/tSM angegeben. Für die Proben aus dem Brennstab H6 ist die Leistung in MW/Node in Tab. 2.43 und Tab. 2.44 angegeben, für die Proben aus den Stäben O1, O12, und O13 des Brennelements NJ070G in Tab. 2.45. Die Leistung wurde für jedes Experiment mit einem konstanten Faktor so normiert, dass die Abweichung der berechneten zur gemessenen <sup>148</sup>Nd Konzentration als Abbrandindikator minimiert wird.

**Tab. 2.42** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 9 und 10 für die Proben aus Stab D5 aus dem Brennelement NJ05YU in MW/tSM

Zyklus	Zeit- schritte [d]	Borkonzen- tration [ppm]	Leistung [MW/tSM]		
			A1	B1	B2
9	74,2	1577	30,447	45,42	41,996
	66,9	1411,5	33,164	46,134	43,233
	72,9	1258,5	34,660	46,506	43,871
	69,9	1082,5	36,436	46,714	44,423
	65,8	881	38,392	46,39	44,451
	75,3	658,5	39,335	45,68	43,935
	58,9	448,5	40,570	45,02	43,485
	65,3	243	41,158	43,978	42,546
	58,8	73,5	41,519	44,108	42,413
	31,4	7,5	46,538	47,019	45,659
Revision	35,0	1	0,000	0	0
11	68,0	1724,5	29,480	42,064	38,904
	63,8	1585	30,139	41,172	38,437
	77,2	1421,5	31,369	40,225	37,964
	63,1	1230,5	32,425	39,621	37,717
	75,3	1028,5	33,411	39,076	37,435
	69,0	818	34,227	38,566	37,105
	70,0	612	34,817	38,044	36,702
	69,9	402	35,193	37,46	36,202
	69,8	200,5	35,643	36,919	35,715
	34,2	52,4	35,889	36,521	35,374

**Tab. 2.43** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 9 und 10 für die erste Hälfte der Proben aus Brennstab H6 aus dem Brennelement NJ05YU in MW/Node

Zyklus	Zeit-schritte [d]	Borkon-zentration [ppm]	Leistung [MW/node]					
			A1B	A2	B1B	B2	B3J	C1
9	74,2	1575,50	0,8252	1,0668	1,2846	1,1401	1,1185	1,1847
	66,9	1411,50	0,9179	1,1464	1,3112	1,1873	1,2019	1,2098
	72,9	1258,50	0,8962	1,0834	1,1878	1,0919	1,1359	1,0888
	69,9	1082,50	0,974	1,1431	1,2165	1,1293	1,1984	1,1139
	65,8	881,00	1,0085	1,1448	1,1855	1,1085	1,2002	1,0856
	75,3	658,50	1,0366	1,1387	1,1589	1,088	1,1938	1,0597
	58,9	448,50	1,0443	1,1168	1,132	1,0597	1,1709	1,0388
	65,3	243,00	1,0499	1,0953	1,1082	1,036	1,1484	1,0157
	58,8	73,50	1,0206	1,0511	1,1029	1,0078	1,102	1,0178
	31,4	7,50	0,9066	0,9422	1,0805	0,9385	0,9878	1,062
Revision	35,0	901,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	68,0	1724,50	0,7638	0,9748	1,1517	1,0302	1,0221	1,0488
	63,8	1585,00	0,7222	0,8842	1,0231	0,9221	0,9271	0,9367
	77,2	1421,50	0,75	0,8896	0,9914	0,905	0,9327	0,9118
	63,1	1231,00	0,7814	0,8996	0,9709	0,8951	0,9432	0,8967
	75,3	1029,00	0,8081	0,9057	0,9574	0,8878	0,9496	0,8847
	69,0	818,00	0,8307	0,9066	0,9432	0,8773	0,9506	0,8737
	70,0	612,00	0,8477	0,9023	0,9301	0,8647	0,946	0,8626
	69,9	402,00	0,8594	0,8939	0,9183	0,8529	0,9372	0,8506
	69,8	200,50	0,8638	0,8815	0,906	0,8393	0,9242	0,8396
	34,2	52,40	0,8638	0,8702	0,8969	0,8287	0,9124	0,8327

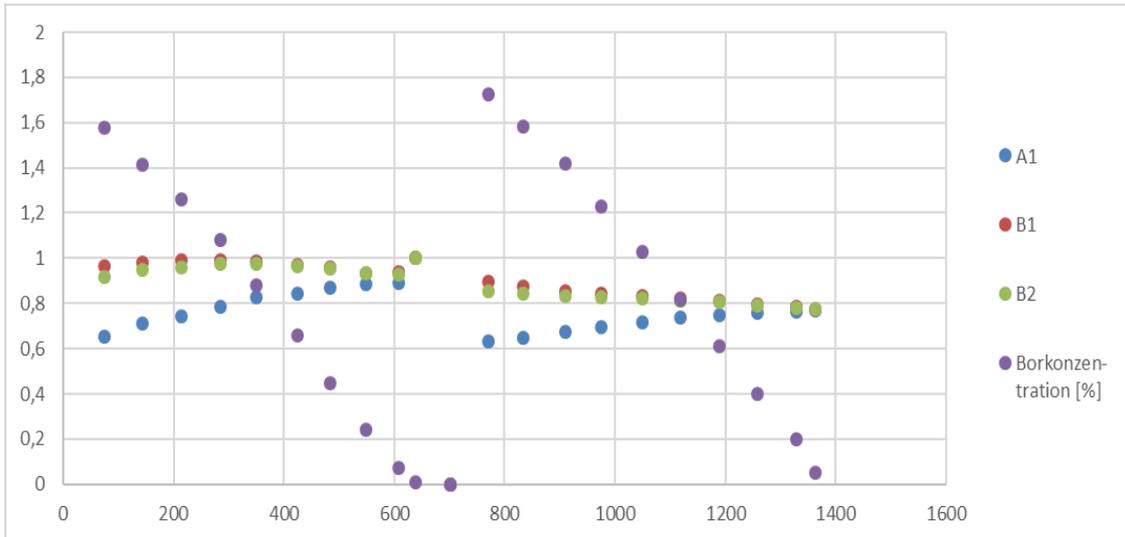
**Tab. 2.44** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 9 und 10 für die zweite Hälfte der Proben aus Brennstab H6 aus dem Brennelement NJ05YU in MW/Node

Zyklus	Zeit-schritte [d]	Borkon-zentration [ppm]	Leistung [MW/Node]				
			C2B	C3	D1A2	D1A4	D2
9	74,2	1575,50	1,2581	1,2111	1,2859	1,1495	0,8924
	66,9	1411,50	1,2749	1,2362	1,3265	1,203	0,9762
	72,9	1258,50	1,146	1,1199	1,1985	1,0942	0,907
	69,9	1082,50	1,1692	1,1469	1,2323	1,1336	0,9627
	65,8	881,00	1,1364	1,1176	1,2064	1,1179	0,9797
	75,3	658,50	1,1102	1,0926	1,1785	1,096	0,9763
	58,9	448,50	1,0862	1,0673	1,1576	1,081	0,9825
	65,3	243,00	1,0634	1,0448	1,1316	1,0578	0,9765
	58,8	73,50	1,0677	1,0398	1,1293	1,0506	0,9691
	31,4	7,50	1,0847	1,0187	1,1933	1,1213	1,0644
Revision	35,0	901,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000
11	68,0	1724,50	1,1196	1,0858	1,1363	0,8088	0,7327
	63,8	1585,00	0,9933	0,9645	1,0219	0,8852	0,7529
	77,2	1421,50	0,9589	0,9346	1,0034	0,8928	0,7737
	63,1	1231,00	0,9382	0,9154	0,9933	0,9027	0,7937
	75,3	1029,00	0,9232	0,9026	0,9835	0,9085	0,8094
	69,0	818,00	0,9097	0,8893	0,9738	0,9111	0,8216
	70,0	612,00	0,8975	0,8769	0,963	0,9097	0,828
	69,9	402,00	0,886	0,8658	0,9502	0,9026	0,8296
	69,8	200,50	0,8752	0,8542	0,9372	0,8959	0,8301
	34,2	52,40	0,8678	0,8456	0,9285	0,8895	0,8295

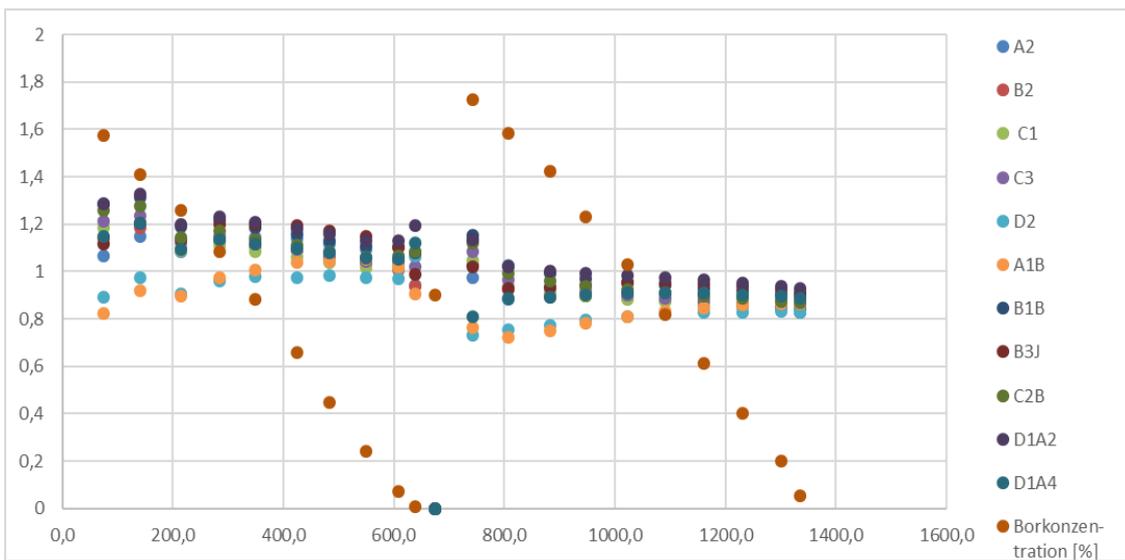
**Tab. 2.45** Bestrahlungsgeschichte des Reaktorzyklus 10 für die Proben aus den Brennstäben O1, O12, und O13 aus dem Brennelement NJ070G in MW/Node

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Nodale Leistung [MW]							
			O1S1	O1S2	O1S3	O12S4	O12S5	O12S6	O13S7	O13S8
10	68,0	1707,41	0,8883	1,3354	1,0692	0,8384	1,2088	0,9756	0,7893	1,1839
	63,8	1527,94	0,9388	1,3285	1,0918	0,8655	1,1621	0,9663	0,8195	1,1501
	77,2	1335,95	0,9916	1,2796	1,0928	0,8953	1,1003	0,9489	0,8551	1,0957
	63,1	1144,91	1,0239	1,2132	1,0677	0,9176	1,0448	0,9255	0,881	1,041
	75,3	956,46	1,0341	1,1604	1,037	0,9315	1,0051	0,904	0,8944	1,0011
	69,0	759,97	1,0416	1,1181	1,0095	0,9448	0,9771	0,8869	0,9068	0,9713
	70,0	570,70	1,0458	1,0887	0,9869	0,9583	0,9588	0,8742	0,9192	0,9534
	69,9	380,20	1,0528	1,0673	0,9676	0,9727	0,9479	0,8632	0,9328	0,9427
	69,8	189,98	1,055	1,0504	0,952	0,9826	0,9392	0,8555	0,9427	0,9344
	34,2	48,37	1,0528	1,0394	0,941	0,9881	0,9343	0,8499	0,9485	0,93

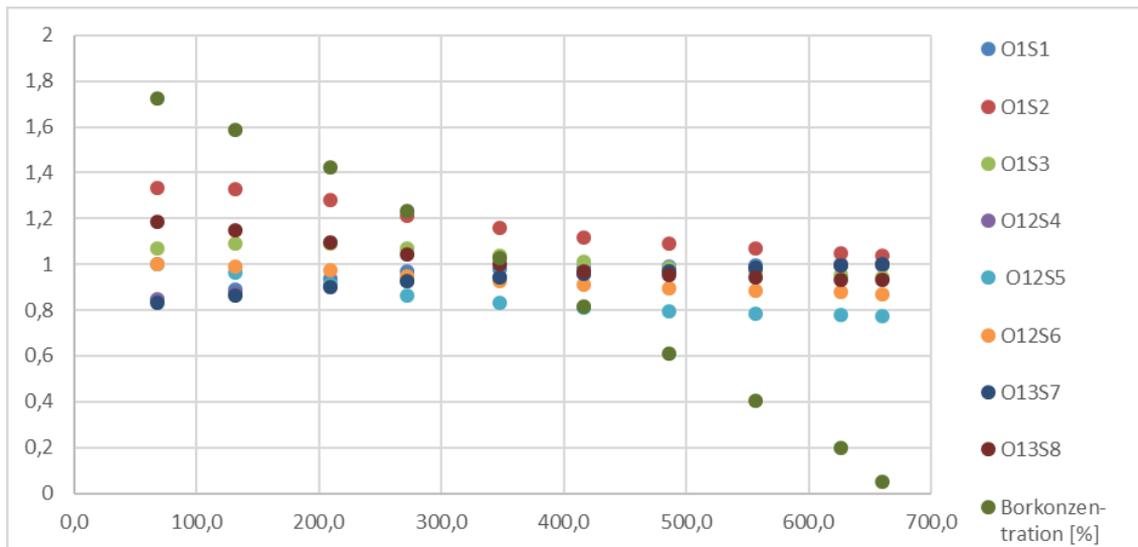
Die zeitliche Entwicklung der Borkonzentration ppm und der Leistung als Bruchteil der jeweiligen Maximalleistung der Proben aus Brennstab D5 des Brennelements NJ05YU sind in Abb. 2.18, aus Brennstab H5 des Brennelements NJ05YU in Abb. 2.19 und aus den Brennstäben O1, O12 und O13 aus dem Brennelement NJ070G in Abb. 2.20 graphisch dargestellt.



**Abb. 2.18** Bestrahlungsgeschichte der Proben aus Brennstab D5 des Brennelements NJ05YU



**Abb. 2.19** Bestrahlungsgeschichte der Proben aus Brennstab H5 des Brennelements NJ05YU



**Abb. 2.20** Bestrahlungsgeschichte der Proben aus den Brennstäben O1, O12 und O13 des Brennelements NJ070G

Für die Abbrandrechnungen wurde die Leistungsgeschichte für jedes Experiment mit einem konstanten Faktor so normiert, dass die Abweichung der berechneten zur gemessenen  $^{148}\text{Nd}$  Konzentration als Abbrandindikator minimiert wird.

Die isotopenaufgelöste Zusammensetzung der Proben wurden mithilfe zerstörender Analysemethoden ermittelt. Die gefundenen Konzentrationen werden in /MIC 17/ in Milligramm pro Gramm anfänglichem Schwermetall (mg/gSMi) für alle Isotope zum Messzeitpunkt angegeben. Die jeweiligen Abklingzeiten zwischen Reaktorabschaltung und Messzeitpunkt wurden in die Tabellen übernommen. Für die Proben aus Brennstab D5 des Brennelements NJ05YU sind die gemessenen Werte in Tab. 2.46 gezeigt, für die erste Hälfte der Proben des Brennstabs H6 des Brennelements NJ05YU in Tab. 2.47, für die zweite Hälfte Tab. 2.48 und für die Proben des Brennelements NJ070G in Tab. 2.49.

**Tab. 2.46** Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt für die Proben aus Brennstab D5 des Brennelements NJ05YU

	<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>
<b>Abklingzeit [d]</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>
<b>Isotop</b>			
<sup>234</sup> U	0,2057	0,1916	0,1816
<sup>235</sup> U	8,618	6,331	6,178
<sup>236</sup> U	5,119	5,507	5,226
<sup>238</sup> U	930,7	925,5	890,3
<sup>238</sup> Pu	0,4039	0,3545	0,4175
<sup>239</sup> Pu	5,072	5,35	4,941
<sup>240</sup> Pu	2,345	2,786	2,546
<sup>241</sup> Pu	1,21	1,361	1,318
<sup>242</sup> Pu	0,6803	0,9246	0,9259
<sup>237</sup> Np	0,605	0,6951	0,6784
<sup>241</sup> Am	0,3472	0,3027	0,2787
<sup>242m1</sup> Am	0,0	0,0	0,0009971
<sup>243</sup> Am	0,1247	0,2545	0,1976
<sup>143</sup> Nd	0,9866	0,9533	1,051
<sup>145</sup> Nd	0,8535	0,8793	0,9526
<sup>148</sup> Nd	0,4877	0,5516	0,5733
<sup>137</sup> Cs	1,685	1,768	1,7
<sup>147</sup> Sm	0,2262	0,1971	0,2466
<sup>149</sup> Sm	0,003118	0,003822	0,003312
<sup>150</sup> Sm	0,3583	0,3748	0,4523
<sup>151</sup> Sm	0,01294	0,01259	0,01451
<sup>152</sup> Sm	0,1219	0,1324	0,1389
<sup>151</sup> Eu	0,0007427	0,0008848	0,0005511
<sup>153</sup> Eu	0,1471	0,1712	0,1798
<sup>154</sup> Eu	0,01005	0,01287	0,01496
<sup>155</sup> Gd	0,008237	0,006072	0,009704
<sup>95</sup> Mo	1,042	1,12	1,113
<sup>99</sup> Tc	1,424	1,083	1,273
<sup>101</sup> Ru	1,117	1,157	1,148

	A1	B1	B2
<b>Abklingzeit [d]</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>
<b>Isotop</b>			
<sup>103</sup> Rh	0,5966	0,6201	0,6063
<sup>109</sup> Ag	0,05119	0,05979	0,04255

**Tab. 2.47** Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt der Nachbestrahlungsanalyseproben für die erste Hälfte der Proben aus Brennstab H6 des Brennelements NJ05YU

	A1B	A2	B1B	B2	B3J	C1
<b>Abklingzeit</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>
<b>Isotop</b>						
<sup>234</sup> U	0,2057	0,1916	0,1816	0,1871	0,1773	0,1981
<sup>235</sup> U	8,618	6,331	6,178	6,216	5,907	6,6
<sup>236</sup> U	5,119	5,507	5,226	5,41	5,274	5,48
<sup>238</sup> U	930,7	925,5	890,3	926,4	890,9	925,7
<sup>238</sup> Pu	0,4039	0,3545	0,4175	0,315	0,3849	0,3305
<sup>239</sup> Pu	5,072	5,35	4,941	5,299	4,918	5,415
<sup>240</sup> Pu	2,345	2,786	2,546	2,733	2,566	2,758
<sup>241</sup> Pu	1,21	1,361	1,318	1,39	1,319	1,426
<sup>242</sup> Pu	0,6803	0,9246	0,9259	0,9162	1,069	0,9016
<sup>237</sup> Np	0,605	0,6951	0,6784	0,6929	0,6824	0,7054
<sup>241</sup> Am	0,3472	0,3027	0,2787	0,3418	0,4891	0,3777
<sup>242m1</sup> Am	0,0	0,0	0,0009971	0,0	0,001203	0,0
<sup>243</sup> Am	0,1247	0,2545	0,1976	0,2557	0,204	0,2462
<sup>143</sup> Nd	0,9866	0,9533	1,051	1	1,025	0,9812
<sup>145</sup> Nd	0,8535	0,8793	0,9526	0,9079	0,9444	0,8988
<sup>148</sup> Nd	0,4877	0,5516	0,5733	0,5456	0,5568	0,5461
<sup>137</sup> Cs	1,685	1,768	1,7	1,751	1,675	1,814
<sup>147</sup> Sm	0,2262	0,1971	0,2466	0,1862	0,2397	0,187
<sup>149</sup> Sm	0,003118	0,003822	0,003312	0,00327	0,003083	0,003194
<sup>150</sup> Sm	0,3583	0,3748	0,4523	0,3761	0,4374	0,3841
<sup>151</sup> Sm	0,01294	0,01259	0,01451	0,01343	0,01425	0,0125
<sup>152</sup> Sm	0,1219	0,1324	0,1389	0,1297	0,1372	0,1268
<sup>151</sup> Eu	0,0007427	0,0008848	0,0005511	0,0007948	0,0007225	0,0006868

	A1B	A2	B1B	B2	B3J	C1
<b>Abklingzeit</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>
<b>Isotop</b>						
<sup>153</sup> Eu	0,1471	0,1712	0,1798	0,1677	0,1773	0,1675
<sup>154</sup> Eu	0,01005	0,01287	0,01496	0,01315	0,009978	0,01435
<sup>155</sup> Gd	0,008237	0,006072	0,009704	0,006559	0,01007	0,006369
<sup>95</sup> Mo	1,042	1,12	1,113	1,13	1,087	1,102
<sup>99</sup> Tc	1,424	1,083	1,273	1,093	1,203	1,083
<sup>101</sup> Ru	1,117	1,157	1,148	1,204	1,131	1,166
<sup>103</sup> Rh	0,5966	0,6201	0,6063	0,6299	0,5996	0,6193
<sup>109</sup> Ag	0,05119	0,05979	0,04255	0,0529	0,07528	0,05369

**Tab. 2.48** Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt der Nachbestrahlungsanalyseproben für die zweiten Hälfte der Proben des Brennstabs H6 des Brennelements NJ05YU

	C2B	C3	D1A2	D1A4	D2
<b>Abklingzeit</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>	<b>1711</b>	<b>1711</b>	<b>1103</b>
<b>Isotop</b>					
<sup>234</sup> U	0,1753	0,185	0,1864	0,1907	0,1927
<sup>235</sup> U	6,037	6,262	6,738	7,227	7,39
<sup>236</sup> U	5,026	5,337	5,273	5,178	5,342
<sup>238</sup> U	894,3	925,0	887,8	891,2	930,7
<sup>238</sup> Pu	0,4445	0,2516	0,3684	0,3618	0,3257
<sup>239</sup> Pu	4,838	5,522	5,273	5,213	5,435
<sup>240</sup> Pu	2,468	2,849	2,619	2,531	2,671
<sup>241</sup> Pu	1,288	1,406	1,42	1,381	1,368
<sup>242</sup> Pu	0,9033	0,925	0,9322	0,909	0,7958
<sup>237</sup> Np	0,6654	0,6836	0,6827	0,6612	0,6766
<sup>241</sup> Am	0,4919	0,3034	0,324	0,508	0,3462
<sup>242m1</sup> Am	0,001628	0,0	0,0005886	0,0008101	0,0
<sup>243</sup> Am	0,1896	0,247	0,1989	0,1782	0,1927
<sup>143</sup> Nd	1,002	0,9527	1,074	1,043	0,9149
<sup>145</sup> Nd	0,9122	0,8982	0,9677	0,9268	0,8302
<sup>148</sup> Nd	0,5545	0,5587	0,5859	0,5293	0,4877
<sup>137</sup> Cs	1,708	1,702	1,483	1,595	1,619

	<b>C2B</b>	<b>C3</b>	<b>D1A2</b>	<b>D1A4</b>	<b>D2</b>
<b>Abklingzeit</b>	1711	1103	1711	1711	1103
<b>Isotop</b>					
<sup>147</sup> Sm	0,2218	0,1822	0,2432	0,2272	0,1824
<sup>149</sup> Sm	0,003255	0,002904	0,003729	0,003476	0,003099
<sup>150</sup> Sm	0,406	0,3626	0,4377	0,3983	0,349
<sup>151</sup> Sm	0,01288	0,01258	0,015	0,01363	0,01266
<sup>152</sup> Sm	0,1261	0,1258	0,1376	0,1292	0,121
<sup>151</sup> Eu	0,0006815	0,0008491	0,0006401	0,0006443	0,0007045
<sup>153</sup> Eu	0,1672	0,1609	0,1829	0,1684	0,1564
<sup>154</sup> Eu	0,009659	0,01276	0,009499	0,01221	0,01229
<sup>155</sup> Gd	0,009122	0,006678	0,009854	0,01346	0,005603
<sup>95</sup> Mo	1,064	1,008	1,074	1,052	0,9214
<sup>99</sup> Tc	1,315	1,036	1,101	1,15	0,9772
<sup>101</sup> Ru	1,136	1,027	1,092	1,06	0,9493
<sup>103</sup> Rh	0,5956	0,5485	0,5966	0,5819	0,5165
<sup>109</sup> Ag	0,06332	0,0925	0,04457	0,08172	0,04663

**Tab. 2.49** Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt für die Proben des Brennelements NJ070G

Probe	O1S1	O1S2	O1S3	O12S4	O12S5	O12S6	O13S7	O13S8
<b>Abklingzeit [d]</b>	<b>1298</b>	<b>1529</b>	<b>1298</b>	<b>1298</b>	<b>1529</b>	<b>1298</b>	<b>1529</b>	<b>1529</b>
<b>Isotop</b>								
<sup>234</sup> U	3,266E-01	3,040E-01	3,137E-01	3,335E-01	3,129E-01	3,262E-01	3,430E-01	3,187E-01
<sup>235</sup> U	2,206E+01	1,918E+01	2,172E+01	2,358E+01	2,183E+01	2,391E+01	2,378E+01	2,193E+01
<sup>236</sup> U	4,533E+00	4,996E+00	4,672E+00	4,303E+00	4,619E+00	4,387E+00	4,219E+00	4,583E+00
<sup>238</sup> U	9,385E+02	9,355E+02	9,363E+02	9,395E+02	9,370E+02	9,375E+02	9,398E+02	9,372E+02
<sup>238</sup> Pu	7,198E-02	1,085E-01	9,363E-02	6,276E-02	8,808E-02	7,772E-02	6,024E-02	8,707E-02
<sup>239</sup> Pu	5,453E+00	5,594E+00	6,030E+00	5,439E+00	6,006E+00	6,187E+00	5,422E+00	5,886E+00
<sup>240</sup> Pu	1,520E+00	1,852E+00	1,713E+00	1,390E+00	1,649E+00	1,509E+00	1,372E+00	1,621E+00
<sup>241</sup> Pu	7,546E-01	9,159E-01	8,951E-01	6,896E-01	8,405E-01	8,006E-01	6,616E-01	8,238E-01
<sup>242</sup> Pu	1,802E-01	2,844E-01	2,210E-01	1,484E-01	2,061E-01	1,650E-01	1,447E-01	2,024E-01
<sup>237</sup> Np	3,041E-01	3,957E-01	3,642E-01	3,034E-01	3,486E-01	3,281E-01	2,829E-01	3,477E-01
<sup>241</sup> Am	1,145E-01	1,983E-01	1,713E-01	1,522E-01	2,080E-01	1,378E-01	1,626E-01	2,024E-01
<sup>242m1</sup> Am	2,750E-04	4,238E-04	4,213E-04	3,542E-04	4,854E-04	3,722E-04	3,158E-04	4,677E-04
<sup>243</sup> Am	1,502E-02	3,508E-02	2,565E-02	1,691E-02	2,773E-02	1,650E-02	1,607E-02	2,671E-02
<sup>242</sup> Cm	1,774E-05	1,637E-05	2,715E-05	1,851E-05	1,124E-05	1,875E-05	7,001E-06	1,172E-05
<sup>243</sup> Cm	5,162E-05	1,169E-04	9,738E-05	5,975E-05	1,003E-04	6,553E-05	5,610E-05	9,466E-05
<sup>244</sup> Cm	2,496E-03	7,185E-03	4,981E-03	2,715E-03	5,163E-03	3,019E-03	2,462E-03	4,902E-03
<sup>245</sup> Cm	1,117E-04	3,761E-04	2,631E-04	1,165E-04	2,717E-04	1,566E-04	1,071E-04	2,568E-04

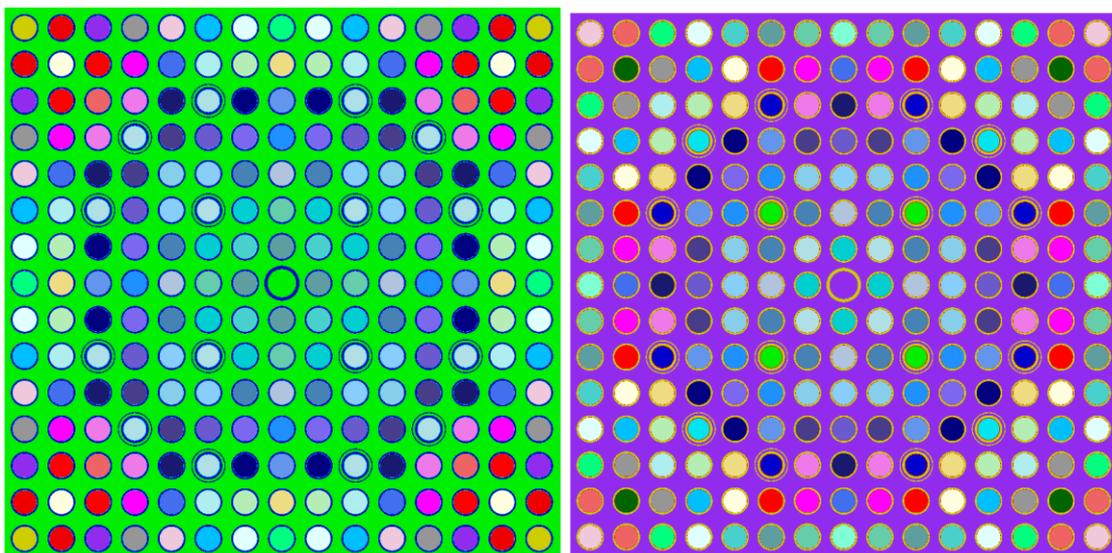
Probe	O1S1	O1S2	O1S3	O12S4	O12S5	O12S6	O13S7	O13S8
Abklingzeit [d]	1298	1529	1298	1298	1529	1298	1529	1529
Isotop								
<sup>143</sup> Nd	7,461E-01	8,345E-01	7,753E-01	7,055E-01	7,646E-01	7,181E-01	6,964E-01	7,601E-01
<sup>145</sup> Nd	5,631E-01	6,427E-01	5,814E-01	5,252E-01	5,725E-01	5,287E-01	5,178E-01	5,698E-01
<sup>146</sup> Nd	5,218E-01	6,156E-01	5,496E-01	4,810E-01	5,397E-01	4,931E-01	4,736E-01	5,361E-01
<sup>148</sup> Nd	2,862E-01	3,349E-01	3,006E-01	2,640E-01	2,942E-01	2,700E-01	2,603E-01	2,924E-01
<sup>150</sup> Nd	1,295E-01	1,534E-01	1,376E-01	1,184E-01	1,340E-01	1,228E-01	1,175E-01	1,331E-01
<sup>134</sup> Cs	2,356E-02	2,582E-02	2,715E-02	2,086E-02	2,127E-02	2,287E-02	1,654E-02	2,128E-02
<sup>137</sup> Cs	9,113E-01	1,095E+00	9,644E-01	8,502E-01	9,370E-01	8,606E-01	8,383E-01	9,466E-01
<sup>147</sup> Sm	1,793E-01	2,058E-01	1,816E-01	1,700E-01	1,883E-01	1,678E-01	1,748E-01	1,865E-01
<sup>149</sup> Sm	4,054E-03	4,079E-03	4,419E-03	4,058E-03	4,160E-03	4,434E-03	3,975E-03	4,143E-03
<sup>150</sup> Sm	2,159E-01	2,601E-01	2,313E-01	1,982E-01	2,258E-01	2,034E-01	1,936E-01	2,231E-01
<sup>151</sup> Sm	1,276E-02	1,375E-02	1,433E-02	1,296E-02	1,415E-02	1,481E-02	1,269E-02	1,415E-02
<sup>152</sup> Sm	8,662E-02	1,001E-01	8,932E-02	8,098E-02	8,686E-02	7,884E-02	7,960E-02	8,613E-02
<sup>151</sup> Eu	3,895E-04	4,434E-04	4,316E-04	4,030E-04	4,704E-04	4,584E-04	4,210E-04	4,677E-04
<sup>153</sup> Eu	7,555E-02	9,449E-02	8,240E-02	6,924E-02	8,105E-02	7,209E-02	6,700E-02	8,070E-02
<sup>155</sup> Gd	2,309E-03	2,891E-03	2,640E-03	1,907E-03	2,511E-03	2,184E-03	1,973E-03	2,531E-03

### 2.3.2 Modellierung

Abb. 2.21 zeigt die Brennelemente in KENO VI-Geometrie, die für alle Analyseproben gleich sind. Die Brennstäbe wurden wie in den experimentellen Daten angegeben mit einem heliumgefüllten Zwischenraum zwischen Brennstoff und Hüllrohr modelliert (Kernzahldichte = 2.404400E-04). Die geometrischen Abmessungen und Materialdaten wurden wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben übernommen.

Es wurde eine Axialzone mit 10 cm Höhe und reflektierenden Randbedingungen modelliert, um die Bedingungen im Druckwasserreaktor nachzubilden. Die Parameter der Abbrandrechnungen sind in Tab. 2.13 wiedergegeben. Die für den Vergleich mit den Nachbestrahlungsanalyseproben betrachteten Nuklide sind in Tab. 2.50 angegeben.

Aus physikalischer Sicht sind auch die Absorberstäbe, die in Zyklus 9 (NJ05YU) beziehungsweise Zyklus 10 (NJ070G) an der Position der Steuerstäbe eingesetzt waren, einem Ausbrand unterzogen. Dies führt zu einer Änderung im Neutronenspektrum und sollte deswegen auch in der Nachrechnung so berücksichtigt werden. Da die Kombination aus Stabwechsel und Definition eines Materials als abbrennbar noch nicht vollständig in MOTIVE implementiert ist, wurde für das Brennelement NJ070G darauf verzichtet, das Absorbermaterial als abbrennbar zu definieren.



**Abb. 2.21** Implementierung der Brennelemente NJ05YU und NJ070G in SCALE-Geometrie

**Tab. 2.50** Liste der betrachteten Nuklide

Betrachtete Nuklide				
$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	
$^{237}\text{Np}$				
$^{238}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$
$^{241}\text{Am}$	$^{242\text{m}1}\text{Am}$	$^{243}\text{Am}$		
$^{242}\text{Cm}^6$	$^{243}\text{Cm}^6$	$^{244}\text{Cm}^6$	$^{245}\text{Cm}^6$	
$^{143}\text{Nd}$	$^{145}\text{Nd}$	$^{146}\text{Nd}^6$	$^{148}\text{Nd}$	$^{150}\text{Nd}^6$
$^{147}\text{Sm}$	$^{149}\text{Sm}$	$^{150}\text{Sm}$	$^{151}\text{Sm}$	$^{152}\text{Sm}$
$^{134}\text{Cs}^6$	$^{137}\text{Cs}$			
$^{151}\text{Eu}$	$^{153}\text{Eu}$	$^{155}\text{Eu}^7$		
$^{155}\text{Gd}$				
$^{95}\text{Mo}^7$	$^{99}\text{Tc}^7$	$^{101}\text{Ru}^7$	$^{103}\text{Rh}^7$	$^{109}\text{Ag}^7$

### 2.3.3 Resultate

Der Vergleich der für die Proben aus TMI-1 erzielten Ergebnisse mit den gemessenen Daten sind in Tab. 2.51 – Tab. 2.53 in tabellarischer Form und in Abb. 2.22 – Abb. 2.27 in graphischer Form dargestellt.

Die Nachrechnungen der Proben des Brennelements NJ07OG weisen eine gute Übereinstimmung für  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  auf. Während die übrigen Uran-Isotope gut getroffen werden, weisen die übrigen Plutonium-Isotope ein deutlich negatives Bias auf.  $^{237}\text{Np}$  wird ebenfalls durch die Rechnung unterschätzt, die Abweichung zum Experiment ist allerdings im Vergleich zu Ergebnissen anderer Experiment-Nachrechnungen relativ gering. Auch die Americium- und Curium-Nuklide werden unterschätzt, wobei die Ergebnisse hier im Bereich anderer Experimente liegen. Auffällig ist dabei das abweichende Verhalten der Probe O1S1. Die Nachrechnung der Spaltprodukte liegt weitgehend im von anderen Nachrechnungen erwarteten Rahmen. Lediglich die deutliche Unterschätzung der Caesium-Nuklide ist auffällig.

---

<sup>6</sup> Nur für Brennelement NJ07OG

<sup>7</sup> Nur für Brennelement NJ05YU

**Tab. 2.51** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %  
für das Brennelement NJ07OG

	<b>O1S1</b>	<b>O1S2</b>	<b>O1S3</b>	<b>O12S4</b>	<b>O12S5</b>	<b>O12S6</b>	<b>O13S7</b>	<b>O13S8</b>
<sup>234</sup> U	0,3	2,0	3,0	0,7	3,5	2,0	-1,7	1,9
<sup>235</sup> U	3,0	3,1	0,5	3,0	2,3	-0,1	3,2	2,4
<sup>236</sup> U	-4,8	-3,8	-4,4	-5,1	-4,4	-5,3	-4,2	-4,1
<sup>238</sup> U	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0
<sup>237</sup> Np	-5,1	-8,8	-14,6	-13,1	-11,4	-16,8	-8,9	-12,7
<sup>238</sup> Pu	-16,9	-17,6	-26,9	-18,7	-23,2	-29,9	-19,0	-24,1
<sup>239</sup> Pu	-1,4	-1,1	-9,8	-1,8	-8,9	-13,1	-2,2	-7,4
<sup>240</sup> Pu	-7,8	-10,1	-13,7	-7,2	-11,4	-12,4	-7,7	-10,7
<sup>241</sup> Pu	-9,0	-10,7	-18,1	-9,9	-16,6	-20,0	-11,0	-15,7
<sup>242</sup> Pu	-14,9	-18,2	-21,2	-16,5	-19,3	-20,3	-17,9	-19,1
<sup>241</sup> Am	27,7	4,3	-8,0	-13,0	-14,6	0,0	-9,3	-13,0
<sup>242m1</sup> Am	-12,0	-21,7	-33,9	-38,3	-41,0	-34,4	-33,2	-39,5
<sup>243</sup> Am	13,4	-13,1	-20,3	-23,4	-29,1	-14,1	-23,7	-28,6
<sup>242</sup> Cm	-3,8	-37,6	-28,1	-22,9	-31,2	-17,9	-22,2	-35,1
<sup>243</sup> Cm	7,9	-16,7	-31,4	-26,9	-35,3	-27,2	-27,9	-33,1
<sup>244</sup> Cm	10,7	-18,0	-29,8	-28,0	-35,9	-27,3	-28,1	-35,0
<sup>245</sup> Cm	5,2	-19,6	-40,7	-31,6	-43,2	-41,2	-32,5	-42,9
<sup>134</sup> Cs	-16,7	-18,1	-21,8	-18,4	-21,3	-23,3	-19,4	-22,5
<sup>137</sup> Cs	-5,0	-9,1	-5,9	-6,1	-6,6	-5,2	-7,5	-8,1
<sup>143</sup> Nd	1,8	2,0	1,5	1,2	1,4	1,1	1,3	1,5
<sup>145</sup> Nd	1,4	1,6	2,4	1,0	1,9	2,3	1,1	1,8
<sup>146</sup> Nd	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-1,1	-1,0	-0,9	-1,1
<sup>148</sup> Nd	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0
<sup>150</sup> Nd	-1,4	-1,7	-2,4	-0,8	-1,7	-2,1	-1,6	-1,7
<sup>147</sup> Sm	-2,4	0,2	-0,3	-2,7	1,2	0,5	0,4	2,0
<sup>149</sup> Sm	1,5	0,6	-9,5	1,3	-3,2	-10,7	2,9	-3,1
<sup>150</sup> Sm	-1,4	-2,2	-2,8	-1,8	-2,6	-1,9	-1,1	-2,2
<sup>151</sup> Sm	-5,6	-10,4	-15,6	-6,7	-13,3	-18,1	-5,7	-13,6
<sup>152</sup> Sm	1,8	-0,4	2,3	1,2	2,8	5,7	1,7	3,2
<sup>151</sup> Eu	-10,1	-5,4	-18,3	-12,4	-10,7	-22,5	-2,6	-10,5
<sup>153</sup> Eu	-4,0	-5,5	-5,8	-5,8	-6,5	-6,5	-4,6	-6,9
<sup>155</sup> Gd	-21,9	-8,8	-25,9	-16,5	-14,4	-24,2	-11,1	-16,2

**Tab. 2.52** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für die vom ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU

	A2	B2	C1	C3	D2	A1B	B1B	B3J	C2B	D1A2	D1A4
<sup>234</sup> U	2,4	5,8	-0,4	5,0	11,4	6,1	7,4	12,4	14,3	3,3	8,7
<sup>235</sup> U	-1,2	6,0	-0,2	-0,6	13,1	-3,0	-5,2	6,1	4,9	-17,7	-2,3
<sup>236</sup> U	1,1	2,7	1,4	4,8	0,3	4,6	7,7	5,9	11,1	7,2	6,4
<sup>237</sup> Np	-6,9	-7,1	-8,7	-4,0	-15,7	-5,6	-0,6	-3,7	-1,9	0,7	-5,8
<sup>238</sup> Pu	-2,4	8,8	3,8	42,9	-17,0	-34,1	-10,8	-8,6	-21,5	5,1	-12,3
<sup>239</sup> Pu	-5,4	-3,4	-5,3	-7,7	-5,3	1,9	3,1	3,6	5,6	-3,7	-1,8
<sup>240</sup> Pu	0,9	2,7	1,9	-0,2	-2,9	10,6	13,7	10,9	14,8	12,4	9,0
<sup>241</sup> Pu	-4,4	-5,8	-7,5	-5,3	-10,3	-6,3	-5,9	-7,4	-5,3	-11,9	-13,9
<sup>242</sup> Pu	-0,7	-1,8	0,2	2,2	-10,6	4,3	7,3	-12,2	2,9	11,1	-7,1
<sup>241</sup> Am	-15,6	-24,1	-30,9	-13,4	-29,5	-2,5	31,9	-26,0	-26,2	14,0	-30,3
<sup>242m1</sup> Am	-	-	-	-	-	-	-25,0	-38,5	-53,4	25,3	-7,2
<sup>243</sup> Am	-20,0	-23,1	-20,3	-15,0	-26,7	14,0	12,9	1,3	7,7	19,8	1,2
<sup>95</sup> Mo	-1,9	-3,8	-1,3	9,9	7,7	-4,7	1,4	1,6	3,5	7,0	0,8
<sup>99</sup> Tc	5,2	3,2	4,3	11,0	5,4	-27,7	-7,9	-4,7	-13,1	8,4	-4,2
<sup>101</sup> Ru	-0,9	-5,8	-2,7	13,0	7,4	-8,8	3,4	2,2	1,3	11,0	3,9
<sup>103</sup> Rh	5,9	3,7	5,6	21,1	16,7	1,1	11,3	10,4	10,8	14,9	10,0
<sup>109</sup> Ag	93,7	116,5	113,0	27,7	110,0	91,1	187,2	56,3	84,6	182,6	34,6
<sup>137</sup> Cs	-5,7	-6,0	-9,2	-0,9	-9,0	-15,8	-2,2	-3,5	-5,8	14,6	-3,6
<sup>143</sup> Nd	8,8	4,0	6,1	9,9	9,1	1,2	0,3	2,0	4,2	-1,2	-1,3
<sup>145</sup> Nd	9,1	4,7	5,8	7,7	5,4	2,5	3,3	2,1	5,4	3,3	0,4
<sup>148</sup> Nd	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
<sup>147</sup> Sm	18,1	25,2	24,6	28,4	24,6	15,5	9,5	12,1	21,1	11,3	17,6
<sup>149</sup> Sm	-17,0	-4,4	-1,9	8,2	2,4	3,3	-4,2	4,1	-4,1	-13,5	-8,5
<sup>150</sup> Sm	15,8	13,9	11,8	21,3	8,6	5,9	-0,2	0,1	7,3	5,6	4,0
<sup>151</sup> Sm	-5,7	-11,0	-4,2	-4,4	-8,6	-11,4	-17,7	-17,0	-8,1	-19,7	-14,5
<sup>152</sup> Sm	6,8	8,1	10,6	13,0	8,5	7,7	4,2	4,2	12,5	6,9	6,6
<sup>151</sup> Eu	-67,1	-63,1	-57,2	-65,3	-59,5	-41,6	-18,3	-38,2	-34,4	-29,1	-31,7
<sup>153</sup> Eu	-1,9	-0,8	-0,6	5,9	-5,4	0,5	-3,1	-4,6	0,9	-2,9	-4,3
<sup>155</sup> Eu	-33,9	-36,5	-41,4	-32,3	-41,5	-43,8	-53,3	-32,6	-30,7	-24,4	-48,3
<sup>155</sup> Gd	-21,1	-28,2	-25,6	-27,1	-27,6	-31,8	-28,5	-33,8	-27,1	-27,7	-53,5

**Tab. 2.53** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %  
für die vom ORNL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU

	A1	B1	B2	C2D1	C2D2		A1	B1	B2	C2D1	C2D2
<sup>234</sup> U	5,8	5,3	5,6	6,7	3,9	<sup>142</sup> Nd	0,4	3,1	2,4	2,1	2,2
<sup>235</sup> U	-3,5	-5,7	-9,4	-8,0	-4,9	<sup>143</sup> Nd	-3,3	-3,4	-4,6	-3,7	-2,8
<sup>236</sup> U	0,6	0,9	0,3	-0,4	0,2	<sup>144</sup> Nd	-3,7	-3,4	-2,9	-3,5	-4,1
<sup>238</sup> U	-0,7	-1,0	-1,0	-1,4	-1,2	<sup>145</sup> Nd	-2,6	-2,4	-2,3	-2,6	-2,6
<sup>237</sup> Np	-17,3	-22,7	-22,1	-24,9	-23,0	<sup>146</sup> Nd	-2,1	-2,0	-2,0	-2,1	-1,8
<sup>238</sup> Pu	5,0	9,1	9,1	-0,4	10,0	<sup>148</sup> Nd	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,1
<sup>239</sup> Pu	-5,7	-7,2	-12,9	-9,0	-4,1	<sup>150</sup> Nd	2,4	2,3	2,4	2,8	1,9
<sup>240</sup> Pu	3,6	2,1	-1,5	-1,1	2,5	<sup>147</sup> Sm	-1,4	-1,3	-1,6	-2,0	-2,7
<sup>241</sup> Pu	-0,3	-2,5	-6,8	-6,0	0,0	<sup>148</sup> Sm	-5,8	-4,9	-7,3	-6,0	-4,7
<sup>242</sup> Pu	6,6	6,1	6,1	2,7	5,3	<sup>149</sup> Sm	-10,8	0,7	-2,2	-9,3	-4,7
<sup>241</sup> Am	1,7	1,0	-0,4	7,9	9,4	<sup>150</sup> Sm	3,3	3,8	2,4	2,5	2,8
<sup>243</sup> Am	-11,6	-18,2	-17,2	-20,4	-18,7	<sup>151</sup> Sm	-23,5	-10,1	-16,0	-11,3	-7,0
<sup>244</sup> Cm	-6,5	-14,4	-15,5	-17,9	-12,7	<sup>152</sup> Sm	1,7	2,4	3,7	2,1	1,0
<sup>109</sup> Ag	-3,4	6,2	22,8	4,7	6,2	<sup>154</sup> Sm	4,5	8,5	6,2	5,8	7,2
<sup>95</sup> Mo	-18,8	-16,5	-10,8	-16,1	-20,1	<sup>151</sup> Eu	-10,1	-12,0	-13,8	-10,6	-9,2
<sup>103</sup> Rh	-19,3	-9,5	1,4	-4,7	-13,0	<sup>153</sup> Eu	3,3	3,0	1,7	2,1	1,5
<sup>199</sup> Tc	-6,4	-10,4	5,5	-1,8	-12,5	<sup>154</sup> Eu	10,5	9,8	3,3	6,9	9,0
<sup>133</sup> Cs	4,7	3,9	4,6	2,5	3,5	<sup>155</sup> Eu	6,2	7,2	5,4	4,4	1,2
<sup>134</sup> Cs	-5,1	-2,2	4,4	1,2	-7,1	<sup>154</sup> Gd	5,8	7,1	1,3	7,2	10,0
<sup>135</sup> Cs	4,0	2,4	-0,4	-2,4	0,7	<sup>155</sup> Gd	4,1	4,7	4,3	3,9	4,2
<sup>137</sup> Cs	5,2	4,6	4,1	3,0	4,1	<sup>156</sup> Gd	0,4	1,9	0,1	0,3	1,4
<sup>140</sup> Ce	2,7	4,2	1,7	1,9	4,2	<sup>157</sup> Gd	-31,5	-5,4	-33,6	-21,1	-20,0
<sup>142</sup> Ce	5,5	6,7	4,5	5,1	6,7	<sup>158</sup> Gd	17,9	23,5	19,1	19,7	22,4
						<sup>160</sup> Gd	-0,5	5,3	2,8	3,3	4,2

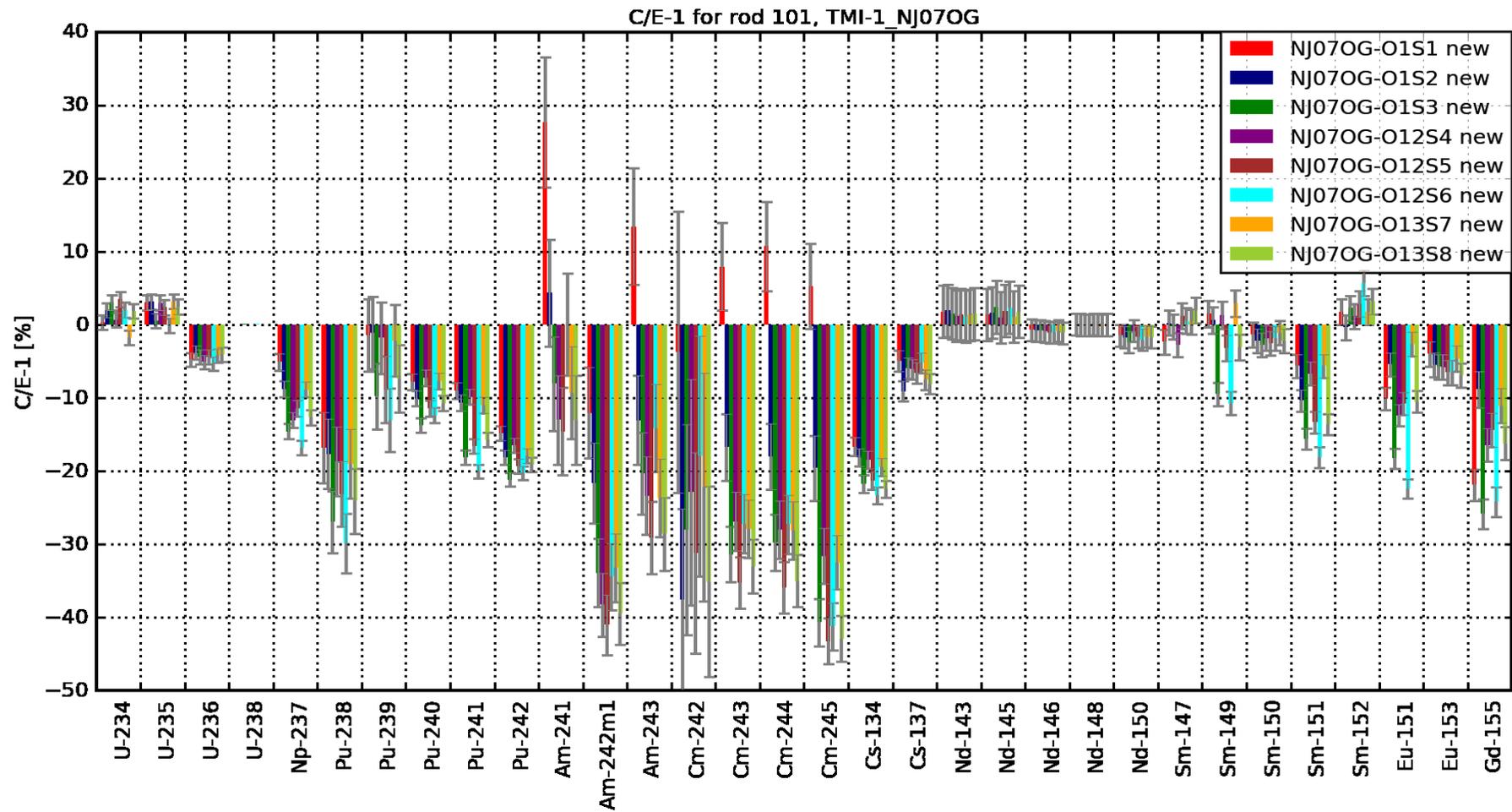
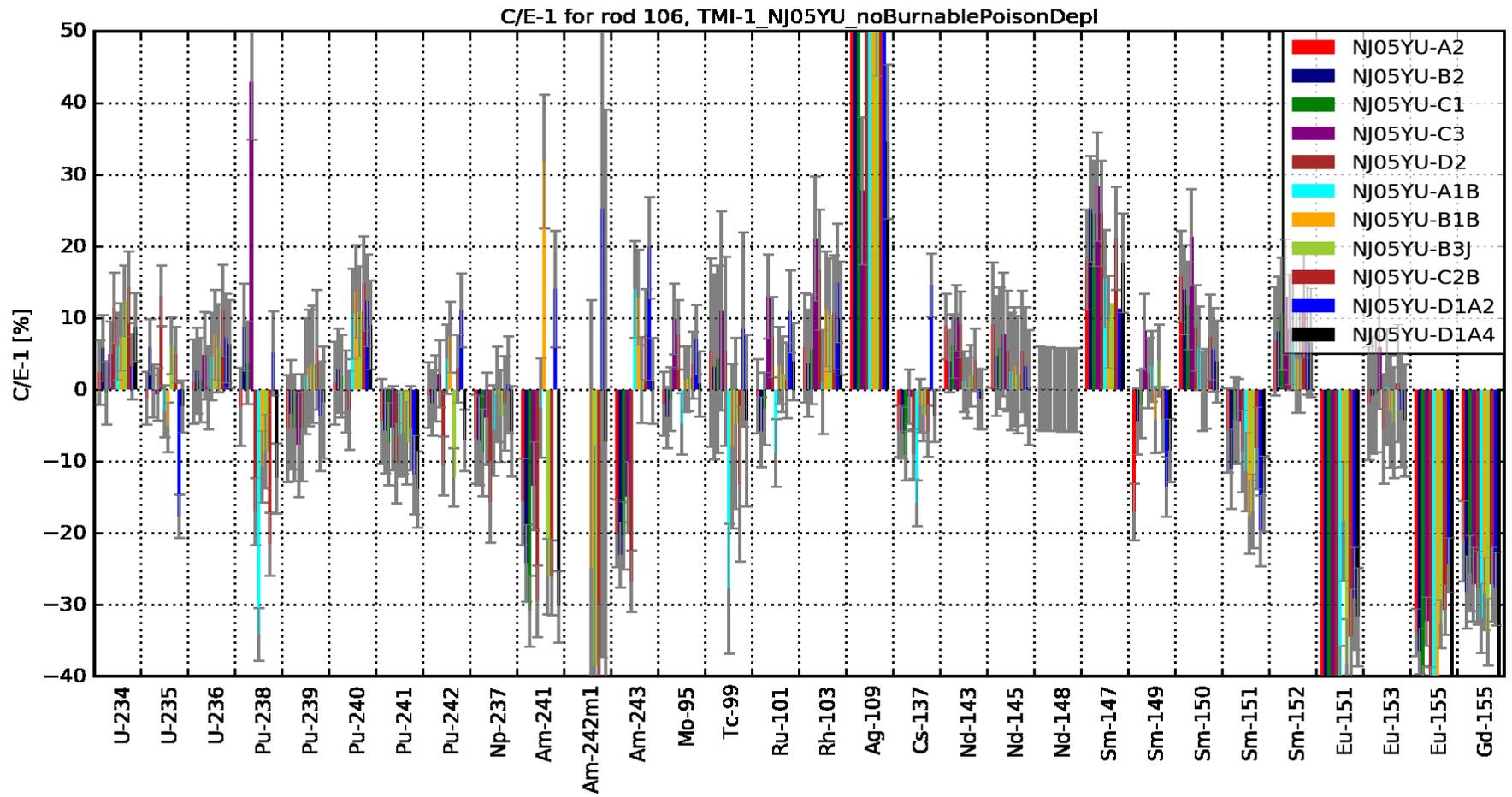
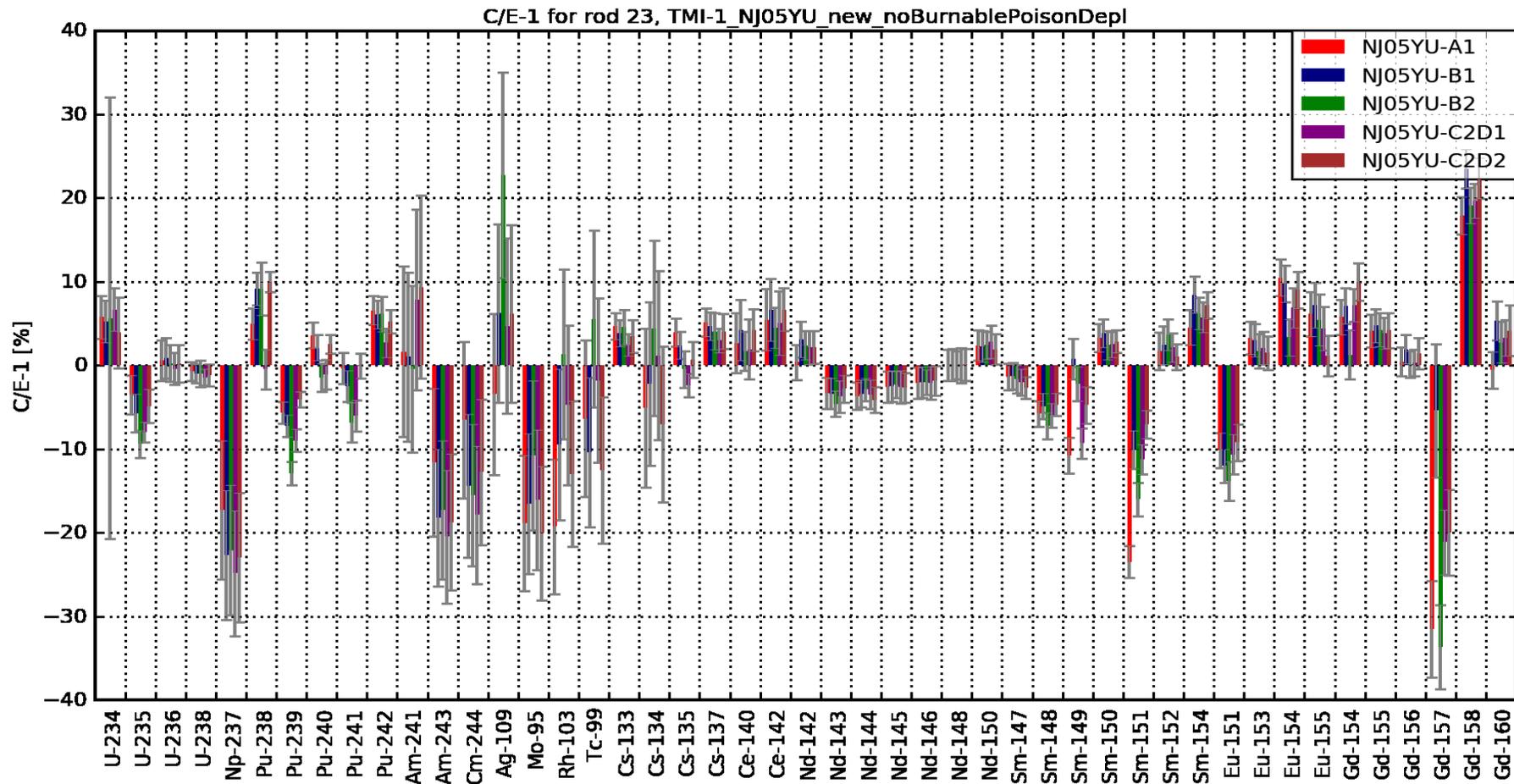


Abb. 2.22 TMI-1, NJ07OG: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

LL



**Abb. 2.23** TMI-1, NJ05YU: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent für die von ANL gemessenen Proben



**Abb. 2.24** TMI-1, NJ05YU: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent für die von ORNL gemessenen Proben

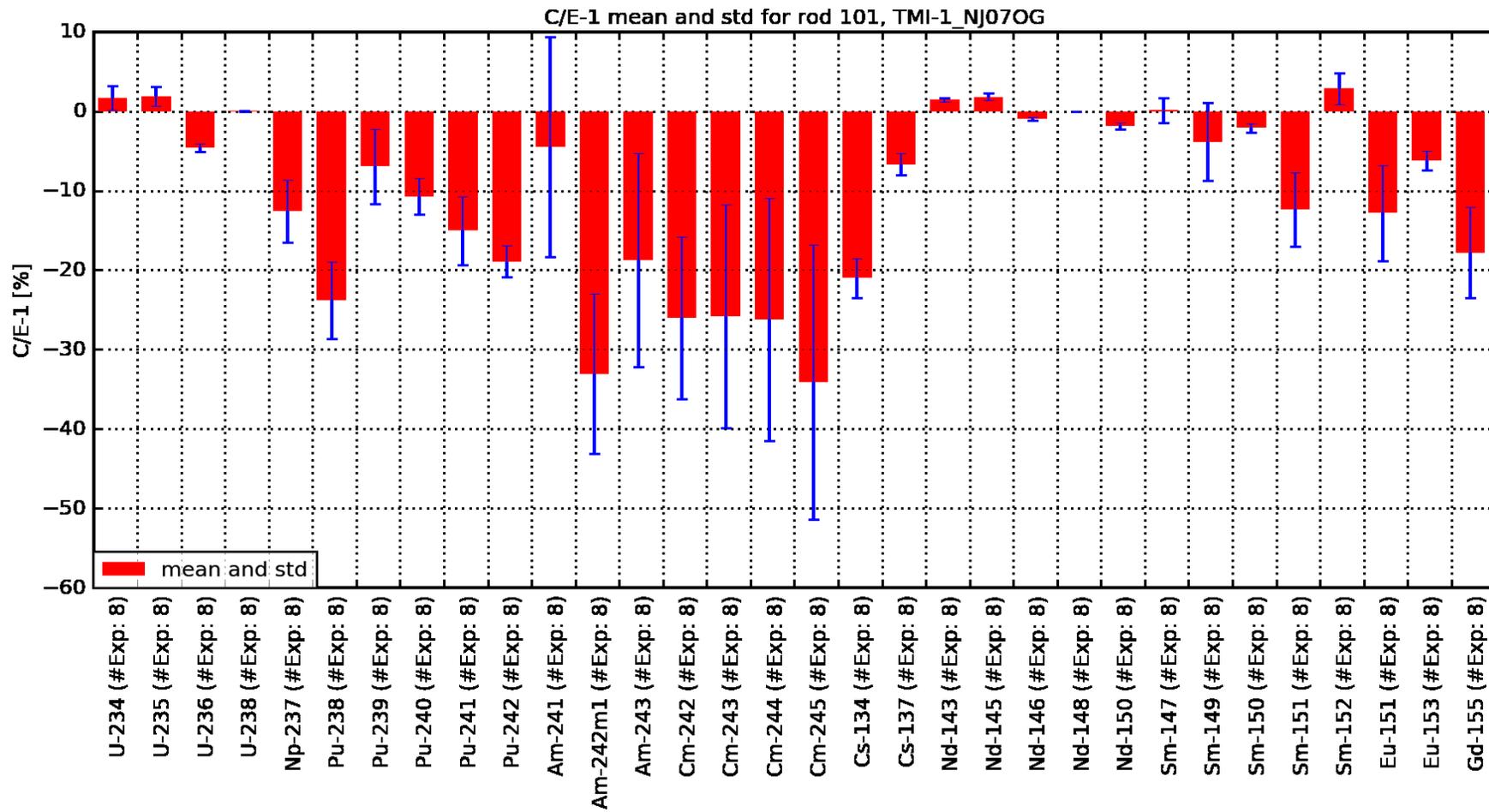
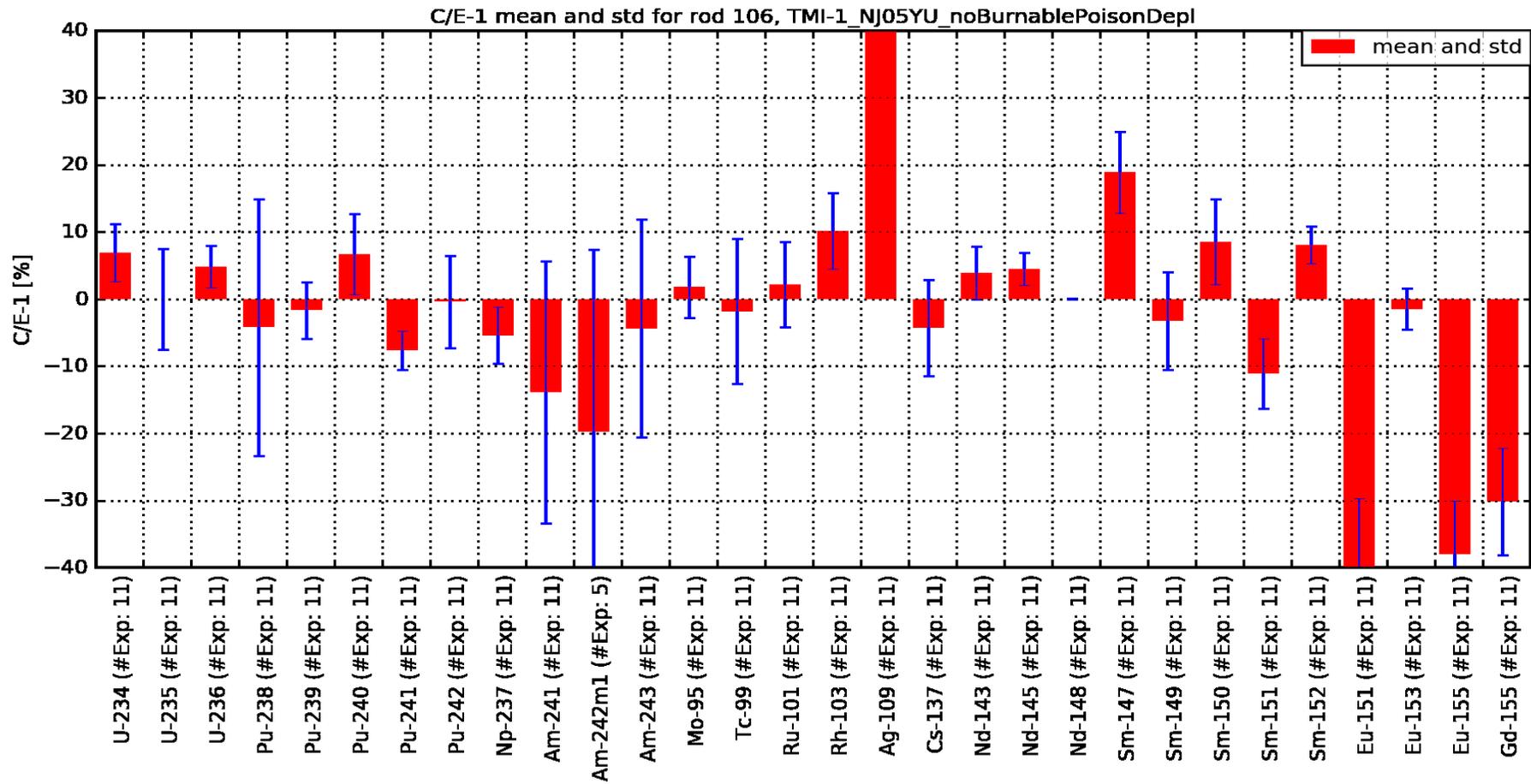
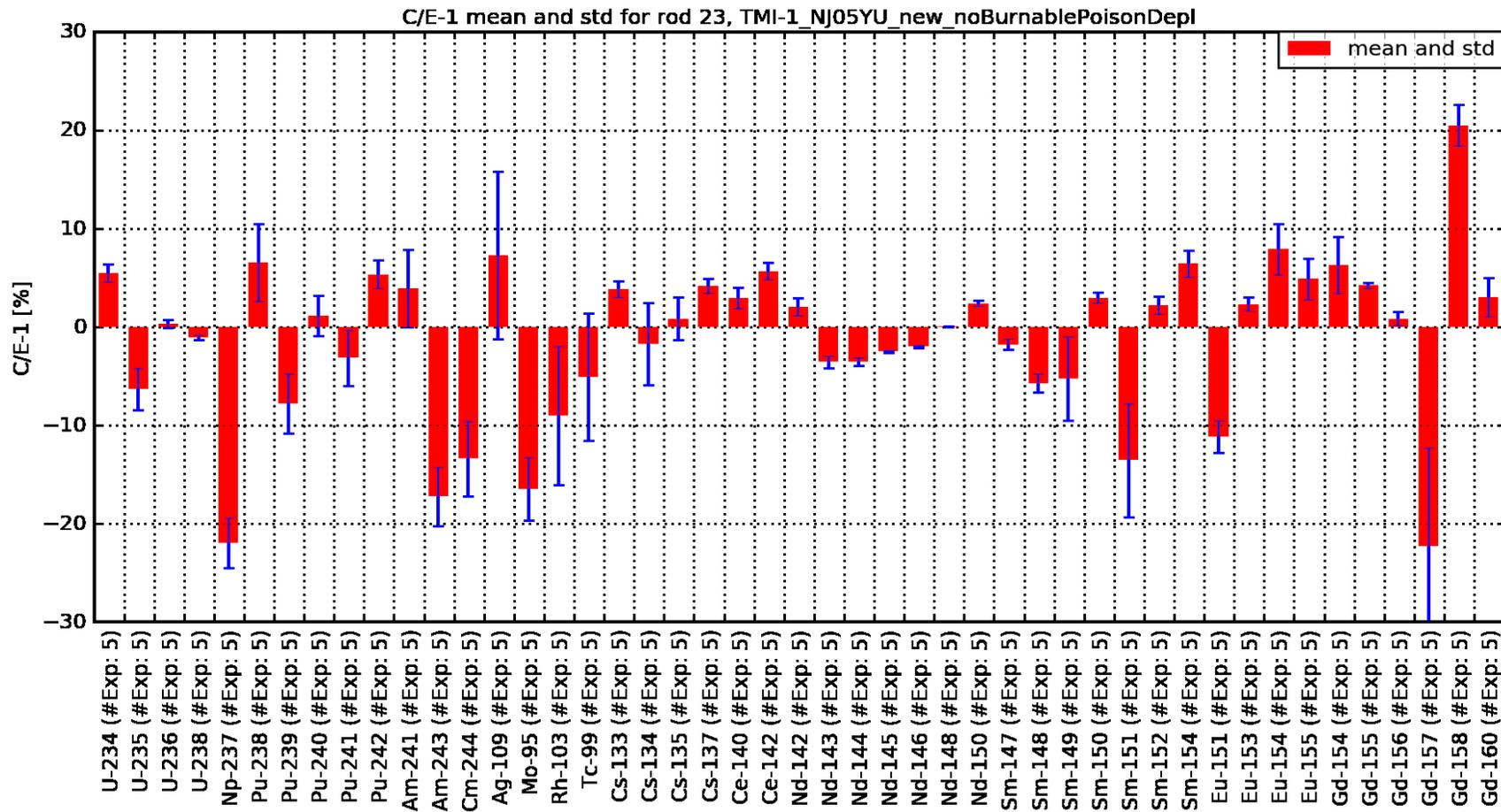


Abb. 2.25 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben des Brennelements NJ07OG



**Abb. 2.26** Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die von ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU



**Abb. 2.27** Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die von ORNL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU

Der Vergleich zwischen Rechnung und Experiment für die von ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU weist für viele Nuklide eine große Streubreite auf. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Experimenten großen Messunsicherheiten kann dennoch festgestellt werden, dass für viele Nuklide die berechneten Werte mit den gemessenen im Rahmen der Messunsicherheiten kompatibel sind. Insbesondere gilt dies auch für die Uran- und Plutonium-Isotope. Größere Abweichungen sind vor allem bei den Spaltprodukten  $^{109}\text{Ag}$  (metallisch) sowie  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$  und  $^{155}\text{Gd}$  zu beobachten.

Die Varianz der von ORNL gemessenen Daten für die Proben des Brennelements NJ05YU ist im Vergleich deutlich kleiner. Allerdings weisen  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  ein negatives Bias auf, was darauf schließen lässt, dass in der Rechnung das tatsächlich während der Bestrahlung herrschende Neutronenflussspektrum nicht exakt reproduziert werden konnte. Für die Probe B2, die insgesamt den größten Bias aufweist, ist anzumerken, dass diese von der Position eines Abstandshalters stammt. Eine explizite Modellierung würde hier eventuell zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen. Die übrigen Uran- und Plutonium-Isotope werden weitgehend gut getroffen. Die höheren Aktinoiden liegen im Bereich vergleichbarer Nachrechnungen. Dies gilt ebenso für die Spaltprodukte. Auffällig ist die gute Reproduktion vieler Nukliddichten der Europium- und Gadolinium-Nuklide. Lediglich  $^{157}\text{Gd}$  und  $^{158}\text{Gd}$  weisen Abweichungen größer 10% auf. Ebenso fällt auf, dass die berechneten Nukliddichten für  $^{109}\text{Ag}$  im Rahmen der Messgenauigkeit mit den gemessenen übereinstimmen. Hier schlagen sich möglicherweise Verbesserungen im experimentellen Vorgehen für metallische Spaltprodukte nieder.

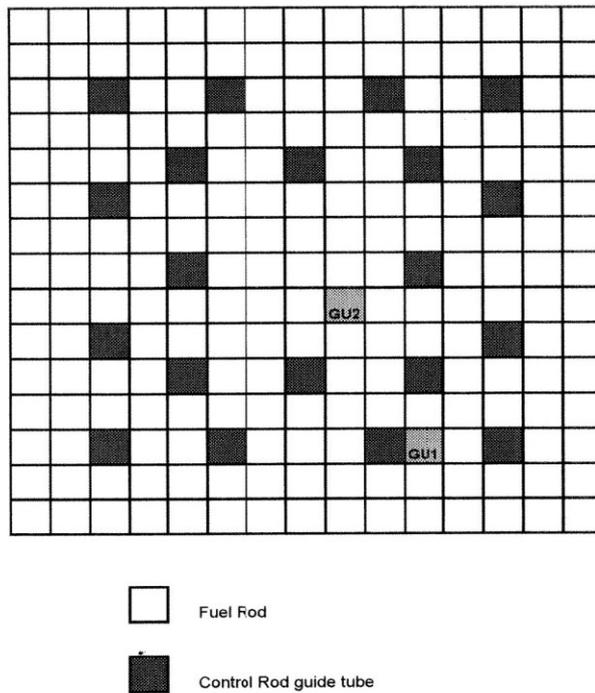
Bei Betrachtung der gemittelten Nuklidinventare (Abb. 2.25 – Abb. 2.27) fallen bei den Daten zum Brennelement NJ07OG und insbesondere bei den von ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU die großen Streubreiten der C/E-1-Werte auf. Diese sind bei den von ORNL gemessenen Proben deutlich kleiner. Dies deutet auf eine gesteigerte Qualität der experimentellen Daten dieser Proben hin.

#### **2.4 Proben des Reaktors Gösgen aus dem ARIANE-Programms**

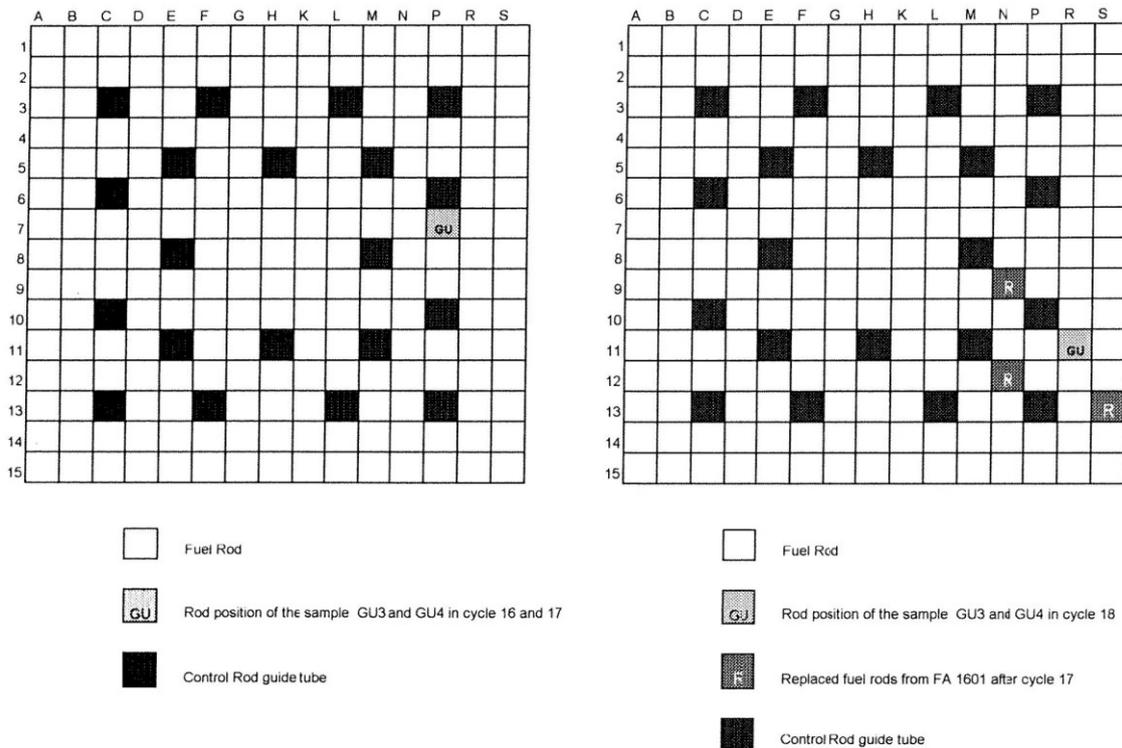
Das ARIANE-Programm hatte zum Ziel, detaillierte Nuklidinventare von bestrahlten  $\text{UO}_2$ - und MOX-Brennstoffen aus Druck- bzw. Siedewasserreaktoren hauptsächlich für Validierungszwecke bereitzustellen. Besonderes Augenmerk wurde dabei vor allem auf Proben mit hohen Abbränden gelegt. Im Einzelnen sind im ARIANE-Programm Proben

von Brennelementen aus den Reaktoren Beznau-I (Kap. 2.5), Gösgen und Dodewaard radiochemisch analysiert worden. Im Fall des Reaktors Gösgen wurden die Proben „GU1“ und „GU2“ aus dem UO<sub>2</sub>-Brennelement 12-40 untersucht (Abb. 2.28). Aufgrund von Problemen während des Programmablaufs und der radiochemischen Analysen wurde das experimentelle Programm nachträglich erweitert und zusätzliche Proben in das Programm aufgenommen. Im Fall des Reaktors Gösgen waren dies die Proben „GU3“ bzw. „GU3'“ und „GU4“ aus dem Brennelement 1601 bzw. 1701, in welches der betreffende Brennstab nach zwei Zyklen im Brennelement 1601 für einen weiteren Zyklus umgesetzt wurde (Abb. 2.29). Eine Folge der aufgetretenen Probleme ist allerdings, dass daher nicht alle vermessenen radiochemischen Proben in gleicher Qualität vorliegen. Die Resultate einzelner Proben erwiesen sich im Nachhinein als nur bedingt oder nicht weiter verwendbar /PRI 03/. Daher wurden für diesen Bericht nur eine Auswahl der insgesamt 15 analysierten Proben nachgerechnet.

Im Folgenden werden die Nachrechnungen der Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 aus dem Reaktor Gösgen beschrieben. Die zunächst im experimentellen Programm enthaltene Probe GU2 wurde nachträglich aufgrund unvorhergesehener experimenteller Schwierigkeiten verworfen und steht damit nicht zur Nachrechnung zur Verfügung. Die Probe GU1 wurde dem Brennstab 14H13 auf Brennstabposition M13 in einer Höhe zwischen 96,05 cm und 99,35 cm (von unteren Brennstabende gemessen) entnommen (Abb. 2.28). Bei den Proben GU3 und GU3' handelt es sich um einen geteilten 10 cm langen Brennelementabschnitt, so dass sie praktisch identischen Bestrahlungsbedingungen ausgesetzt waren und damit aus Sicht der Nachrechnungen als defacto identisch betrachtet werden können. Sie wurden aber in zwei verschiedenen Laboren unabhängig voneinander analysiert, so dass zwei unabhängige Sätze an gemessenen Nuklidkonzentrationen zum Vergleich mit den errechneten Werten vorliegen. Entnommen wurden die Proben GU3/GU3' und GU4 aus dem Brennstab 16B05 auf der Brennstabposition P7 des Brennelements 1601 in einer Höhe von 122,42 cm und 132,42 cm bzw. 4,92 cm und 9,92 cm, bezogen auf das untere Ende des Brennstabs. Die Probe GU4 ist somit eine Probe relativ nahe zum unteren Ende des Brennstabs.



**Abb. 2.28** Schematische Darstellung des Brennelements 12-40 aus dem Reaktor Gösgen /PRI 03/



**Abb. 2.29** Schematische Darstellung der Brennelemente 1601 (links) und 1701 (rechts) aus dem Reaktor Gösgen /PRI 03/

### 2.4.1 Experimentelle Daten

Die für Nachrechnung der radiochemischen Proben notwendigen Informationen, Daten und experimentellen Resultate des ARIANE-Programms sind im Bericht /PRI 03/ zusammengefasst. Dieser Bericht ist seinerseits eine Zusammenstellung einer Reihe von internen Vorträgen und Berichten des ARIANE-Programms, die neben den notwendigen Daten auch den Programmablauf und die aufgetretenen Probleme beschreiben.

#### Reaktordaten

Der Reaktor Gösgen ist ein Druckwasserreaktor mit einer nominellen thermischen Leistung von 3002 MW. Die weiteren für die Probennachrechnungen relevanten Reaktordaten sind in Tab. 2.54 zusammengefasst. Zu beachten ist dabei, dass die Angabe des Moderator- bzw. Kühlmitteldrucks in /PRI 03/ in der Einheit  $\text{kg/cm}^2$  vorliegt. Hier ist zu vermuten, dass diese Angabe mit der Einheit „bar“ gleichzusetzen ist. So gibt z. B. der Betreiber in seiner Broschüre zum Kraftwerk Gösgen einen zahlenwertmäßig ähnlichen Kühlmitteldruck von 154 bar an /KER 15/.

**Tab. 2.54** Relevante Reaktordaten des Reaktors Gösgen /PRI 03/

Parameter	
Nomineller Kühlmitteldruck <sup>1</sup> [ $\text{kg/cm}^2$ ]	153
Kühlmitteleinlasstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	292,0
Kühlmittelauslasstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	326,0

<sup>1</sup> Der Wert wird in /PRI 03/ als Druck beschrieben, auch wenn die angegebene physikalische Einheit mit  $\text{kg/cm}^2$  formal kein Druck ist.

#### Brennelement

Die hier betrachteten Proben stammen bzw. befanden sich in drei verschiedenen, mit Ausnahme des Pelletradius und der aktiven Brennstoffhöhe baugleichen Brennelementen. Diese Brennelemente waren  $15 \times 15$ -DWR-Brennelemente aus  $\text{UO}_2$ -Brennstoff mit einer einheitlichen  $^{235}\text{U}$ -Anreicherung und 20 Steuerstabführungsrohren, (Abb. 2.28 und Abb. 2.29). Angaben zu den geometrischen Abmessungen der Brennelemente und Brennstäbe aus /PRI 03/ sind in Tab. 2.53 zusammengestellt.

**Tab. 2.55** Geometrische Abmessungen der Brennelemente 12-40, 1601 und 1701 sowie dessen Brennstäbe nach /PRI 03/

Parameter	12-40	1601 / 1701
Pelletdurchmesser [cm]	0,913	0,911
Hüllrohrinnendurchmesser [cm]	0,930	
Hüllrohraußendurchmesser [cm]	1,75	
Dish-Volumen [Vol.-%]	1,5	– <sup>1</sup>
Aktive Brennstoffhöhe [cm]	340	355
Steuerstabführungsrohrinnendurchmesser [cm]	1,24	
Steuerstabführungsrohraußendurchmesser [cm]	1,38	
Brennstabmittenabstand [cm]	1,43	
Brennelementmittenabstand [cm]	21,56	

<sup>1</sup> Für die Brennelemente 1601 und 1701 ist in /PRI 03/ kein Wert für ein eventuell vorliegendes Dish-Volumen enthalten.

### Materialzusammensetzung

Bezüglich der Brennstoffzusammensetzung des Brennelements 12-40 bzw. der Probe GU1 enthält /PRI 03/ lediglich explizite Angaben zum <sup>234</sup>U- und <sup>235</sup>U-Anteil im Brennstoff der Probe sowie zu dessen Dichte. Im Fall der Brennelemente 1601 und 1701 bzw. der Proben GU3/GU3' und GU4 beinhaltet /PRI 03/ eine Tabelle mit entsprechenden Angaben, die lediglich mit „Rod Data“ überschrieben ist. Auch hier ist zu vermuten, dass sich die dort aufgeführten Angaben in der Linie auf den Probenstab beziehen. Da es sich, soweit aus den Unterlagen ersichtlich, bei allen hier zur Analyse genutzten Brennelementen um Brennelemente mit einer einheitlichen Anreicherung handelt, ist anzunehmen, dass die Brennstoffzusammensetzungen aller Brennstäbe hinreichend ähnlich sind, dass die Angaben zum Probenstab entsprechend auch für alle anderen Brennstäbe der Brennelemente unterstellt werden können. Die angegebenen Zahlenwerte sind in Tab. 2.56 und Tab. 2.57 zusammengefasst.

Die verschiedenen Angaben zur Brennstoffdichte in Tab. 2.57 sind für die Probe GU1 unter Berücksichtigung des unterstellten Dish-Volumens von 1,5 % miteinander konsistent. Entsprechend gilt dieses auch für die Angaben zu den Proben GU3/GU3' und GU4, wenn dort ebenfalls das gleiche Dish-Volumen unterstellt wird. Allerdings macht /PRI 03/ keine Angaben zu einem möglichen Dish-Volumen bei den Proben GU3/GU3' und GU4. Ohne solche Aussparungen wären dagegen zur Konsistenz der Dichteangaben eine Brennstoffdichte von 10,24 g/cm<sup>3</sup> oder eine lineare Massenbelegung von 6,81 g/cm erforderlich.

**Tab. 2.56** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 nach /PRI 03/

Isotopenverhältnis	wt.-%	
	GU1	GU3/GU3', GU4
$^{234}\text{U} / \text{U}$	0,036	0,042
$^{235}\text{U} / \text{U}$	3,5	4,1
$^{238}\text{U} / \text{U}$	96,464 <sup>1</sup>	95,858

<sup>1</sup> Der Wert wird in /PRI 03/ nicht explizit angegeben.

**Tab. 2.57** Brennstoffdichteangaben für die Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 nach /PRI 03/

Parameter	GU1	GU3/GU3', GU4
Brennstoffdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	10,4	10,4
Lineare Massenbelegung [g/cm]	6,7	6,7

Als Material für die Hüllrohre sowie für die Steuerstabführungsrohre wird in /PRI 03/ einheitlich Zircaloy-4 („Zr-4“) angegeben. Daten zur Dichte oder Zusammensetzung sind dagegen nicht enthalten.

### Bestrahlungsgeschichte

Das Brennelement 12-40 (Probe GU1) wurde von Juli 1990 bis Juni 1994 während der Zyklen 12 bis 15 im Reaktor Gösigen bestrahlt (Tab. 2.58). Die Bestrahlungsschichte dieser Zyklen ist in /PRI 03/ in wenigen Zeitschritten und damit vergleichsweise grob angegeben, und enthält sowohl kern- und brennelementgemittelte Daten wie auch probenspezifische Informationen, also Probenleistung und -abbrand sowie Brennstofftemperatur. Zusammengefasst sind die hier relevanten Informationen in Tab. 2.59.

Die Brennelemente 1601 und 1701 (Proben GU3/GU3' und GU4) wurden von Juni 1994 bis Juni 1997 während der Zyklen 16 bis 18 im Reaktor Gösigen bestrahlt (Tab. 2.58). Die Bestrahlungsgeschichte ist in gleicher Form wie für das Brennelement 12-40 angegeben und die hier relevanten Informationen sind in Tab. 2.60 zusammengefasst. Zu beachten ist hierbei, dass sich der Probenstab für die Zyklen 16 und 17 zunächst im Brennelement 1601 befand und anschließend zusammen mit drei weiteren Stäben aus dem Brennelement 1601 in das Brennelement 1701 umgesetzt (s. u.) und in diesem während des Zyklus 18 weiter bestrahlt wurde (Abb. 2.29). Laut den Ab-

brandangaben in der Bestrahlungsgeschichte war das Brennelement 1701 vor dem Zyklus 18 aber bereits für einen Zyklus im Reaktor. Hierzu sind in /PRI 03/ allerdings keine genauen Angaben enthalten.

Es ist zu beachten, dass in Tab. 2.59 und Tab. 2.60 die Summe der angegebenen Zeitschrittlängen geringfügig von der Anzahl der Tage zwischen gegebenem Zyklusbeginn und -ende abweicht. Dieses ist dadurch begründet, dass die Zeitschrittlängen in Form von sog. „effective (full) power days“ angegeben wurden (Tab. 2.58).

**Tab. 2.58** Bestrahlungszeitraum der Brennelemente 12-40 (Zyklus 12 – 15) sowie 1601 und 1701 (Zyklus 16 – 18) nach /PRI 03/

Zyklus	Zyklusbeginn	Zyklusende	Zyklusdauer Datum <sup>1</sup> [d]	Zyklusdauer Tab. 2.76 <sup>2</sup> [d]	Revision Datum <sup>3</sup> [d]
12	06.07.1990	01.06.1991	330	317,0	32
13	03.07.1991	30.05.1992	332	321,3	16
14	15.06.1992	05.06.1993	355	331,3	26
15	01.07.1993	04.06.1994	338	326,7	25
16	29.06.1994	10.06.1995	346	336,8	25
17	05.07.1995	08.06.1996	339	328,7	22
18	30.06.1996	07.06.1997	342	331,6	

<sup>1</sup> Zykluslänge entsprechend des Beginn- und Enddatums, die Tage von Zyklusbeginn und -ende werden jeweils zur Hälfte der Zyklusdauer und der Revision zugeordnet. Diese Werte sind nachträglich berechnet und so nicht in /PRI 03/ enthalten.

<sup>2</sup> Aus den Bestrahlungsdaten nach Tab. 2.59 bzw. Tab. 2.60 errechnete Zyklusdauer.

<sup>3</sup> Länge der Revisionen entsprechend des Zyklusende und -beginns.

Laut /PRI 03/ sind die für den Reaktor Gösgen angegebene Werte der Bestrahlungsgeschichte keine zeitschrittgemittelten Werte, sondern die Werte zum jeweiligen Zeitpunkt. Dies zeigt sich vor allem beim Vergleich der angegebenen Probenleistung zum Probenabbrand, welche diesem Fall nicht mehr ohne weiteres ineinander ungerechnet werden können. Dementsprechend ergeben sich hier je nach Zeitpunkt teils deutliche Diskrepanzen zwischen dem angegebenen Abbrand und dem nach gegebener Leistung zu erwartenden Abbrand. So weichen z. B. die angegebenen Abbrandzuwächse für die Probe GU4 von den laut Probenleistung zu erwartenden Zuwächsen in einzelnen Fällen um mehr als 20 % voneinander ab.

Bei den angegebenen Moderatortemperaturen sowie den ebenfalls aufgeführten korrespondierenden Moderatorichten handelt es sich allerdings nur um Werte, die über den Reaktorkern gemittelt wurden. Der Vergleich der gegebenen Dichten mit den Werten

der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) /INT 07/ unter Verwendung des angegebenen Kühlmitteldrucks von 153 bar und den gegebenen Moderatortemperaturen zeigt Abweichungen zwischen etwa  $0,002 \text{ g/cm}^3$  und  $0,004 \text{ g/cm}^3$  für die Moderatortemperaturen über  $300 \text{ °C}$  und Abweichungen von weniger als  $0,001 \text{ g/cm}^3$  für die Moderatortemperaturen unterhalb  $300 \text{ °C}$ . Dabei liegen die in /PRI 03/ aufgelisteten Dichten immer unter den Werten der IAPWS. Zwar wird ein Teil dieser Abweichungen durch Rundungseffekte bedingt sind, aufgrund der deutlichen Diskrepanz zwischen den Dichtewerten der höheren Moderatortemperaturen ist aber zu vermuten, dass die in /PRI 03/ aufgeführten Dichtewerte aus den ermittelten Moderatortemperaturen abgeleitet und dafür eine andere bzw. ältere Parametrisierung der Wasserzustandsgrößen als die hier berücksichtigte Parametrisierung der IAPWS verwendet wurde. Damit wären hier die Temperaturen die eigentlich für die Nachrechnung zu berücksichtigenden Größen. Nähere Angaben zur Bestimmung der Dichten werden in /PRI 03/ aber nicht gemacht.

Bezüglich der angegebenen Brennstofftemperaturen wird in /PRI 03/ explizit angegeben, dass es sich hierbei um effektive Brennstofftemperaturen für die jeweiligen Proben handelt.

**Tab. 2.59** Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 12 bis 15 des Reaktors Gösgen für die Probe GU1 /PRI 03/

Zyklus	Akkumulierte Zeit [d]	Borkonzentration [ppm]	Probenstableistung [W/cm]	Probenstababbrand [MWd/tHM]	Moderatortemperatur [°C]	Brennstofftemperatur [K]
12	0,0	1511	346,3	0	307,6	1151,3
	6,0	1179	357,4	364	308,1	1171,5
	150,0	565	334,9	9195	308,0	1136,0
	294,9	8	321,0	17454	308,3	1078,3
	317,0	8	311,7	18649	298,6	1046,7
Revision	45,0					
13	0,0	1477	227,4	18649	306,9	919,3
	6,0	1145	258,8	18899	307,3	967,7
	150,0	542	269,4	25572	307,1	957,9
	292,3	7	272,3	32262	307,5	943,1
	321,3	7	213,9	33594	294,4	842,0
Revision	26,7					
14	0,0	1517	237,6	33594	308,2	888,9
	6,0	1178	241,6	33789	308,7	894,4
	150,0	549	221,1	39879	308,6	854,8
	290,1	5	216,3	45757	308,9	841,4
	331,3	5	139,4	47911	289,5	709,8
Revision	49,7					
15	0,0	1594	191,7	47911	309,4	806,6
	6,0	1243	209,5	48121	309,8	829,8
	150,0	605	200,9	53506	309,6	810,6
	301,9	5	200,8	58842	309,9	804,0
	326,7	5	157,9	59656	297,6	738,9

**Tab. 2.60** Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 16 bis 18 des Reaktors Gösgen für die Proben GU3/GU3' und GU4 /PRI 03/

Zyklus	Akku- mulierte Zeit [d]	Brennele- ment- abbrand [MWd/tHM]	Borkon- zentration [ppm]	Probe GU3/GU3'				Probe GU4			
				Proben- leistung [W/cm]	Probenstab- abbrand [MWd/tHM]	Modera- tortempe- ratur [°C]	Brennstoff- temperatur [K]	Proben- leistung [W/cm]	Probenstab- abbrand [MWd/tHM]	Modera- tortempe- ratur [°C]	Brennstoff- temperatur [K]
16 (Brennelement 1601)	0,0	0	1705	376,3	0	308,7	1203,1	92,5	0	308,7	731,1
	6,0		1347	398,5	403	308,7	1244,1	124,2	111	308,7	782,0
	150,0		690	369,2	10171	308,7	1194,6	191,8	4001	308,7	901,1
	320,0		5	346,4	20796	308,7	1154,1	261,1	10530	308,7	1008,5
	336,8	19400	5	298,1	21771	300,2	1065,2	212,8	11248	300,2	919,9
Revision	34,2										
17 (Brennelement 1601)	0,0	19400	1601	300,2	21771	308,7	1052,5	98,0	11248	308,7	744,8
	6,0		1247	314,3	22096	308,7	1068,5	125,7	11372	308,7	786,9
	150,0		602	295,5	29872	308,7	1005,0	183,2	15250	308,7	865,5
	299,5		9	287,4	37461	308,4	978,7	242,3	20608	308,4	949,8
	328,7	35000	9	234,5	38866	297,1	865,4	185,5	21762	297,1	851,2
Revision	32,3										
18 (Brennelement 1701)	0,0	17700	1675	280,8	38866	308,7	944,7	75,0	21762	308,7	687,0
	6,0		1300	273,6	39149	308,7	933,6	90,5	21858	308,7	709,1
	150,0		631	236,7	45417	308,7	866,6	125,4	24504	308,7	756,8
	301,2		17	230,8	51400	308,4	858,0	167,2	28298	308,4	805,6
	331,6	33100	17	193,2	52504	297,2	794,9	130,6	29067	297,2	744,6

Neben den genannten Bestrahlungsdaten der betreffenden Brennelemente ist ferner zu beachten, dass in den hier relevanten Zeiträumen verschiedene Stabwechsel an den Brennelementen vorgenommen wurden. So wurden im Brennelement 12-40 zum Zyklus 14 drei Brennstäbe und zum Zyklus 15 weitere drei Brennstäbe in direkter Nachbarschaft zum Probenstab ausgetauscht. Die Positionen der ausgetauschten Brennstäbe und deren stabweise Abbrände gibt Abb. 2.30 wieder. Informationen zur Herkunft dieser Stäbe sind in /PRI 03/ nicht wiedergegeben. Die Angaben der stabweisen Abbrände lassen aber vermuten, dass in der Mehrzahl der Fälle die ausgetauschten Brennstäbe durch Stäbe mit einer ähnlichen Abbrandhistorie ersetzt wurden. So wurden zum Zyklus 14 die Brennstäbe auf den Positionen L12 und M12 durch Brennstäbe mit jeweils einem mittleren Abbrand von etwa 30 GWd/tHM ersetzt<sup>8</sup>, also einem Abbrand, wie er auch für die ursprünglich auf diesen Positionen vorhandenen Stäben zu diesem Zeitpunkt zu erwarten war, wie sich durch Vergleich mit den Abbränden der nicht ausgetauschten benachbarten Brennstäben ergibt (Abb. 2.30). Lediglich der ursprüngliche Brennstab auf der Position N12 wurde demnach durch einen Brennstab ersetzt, welcher mit knapp 43 GWd/tHM einen offensichtlich deutlich höheren Abbrand als der ursprüngliche Stab aufwies. Ein ähnliches Bild zeigt sich für den Zyklus 15. Hier gibt Abb. 2.30 direkt Aufschluss über die stabweisen Abbrände zum Ende des 14. und Beginn des 15. Zyklus. So werden wieder die Brennstäbe auf den Positionen M14 und L12 durch Stäbe mit ähnlichen Abbränden ersetzt, wohingegen der Stab auf Position L14 durch einen Stab mit einem deutlich höheren Abbrand ersetzt wird. Inwiefern die nachträglich eingesetzten Brennstäbe vor ihrem Einsatz im Brennelement 12-40 ggf. längere Zeit gelagert wurden und damit einer entsprechenden Abklingzeit ausgesetzt waren, geht aus den Angaben in /PRI 03/ nicht hervor.

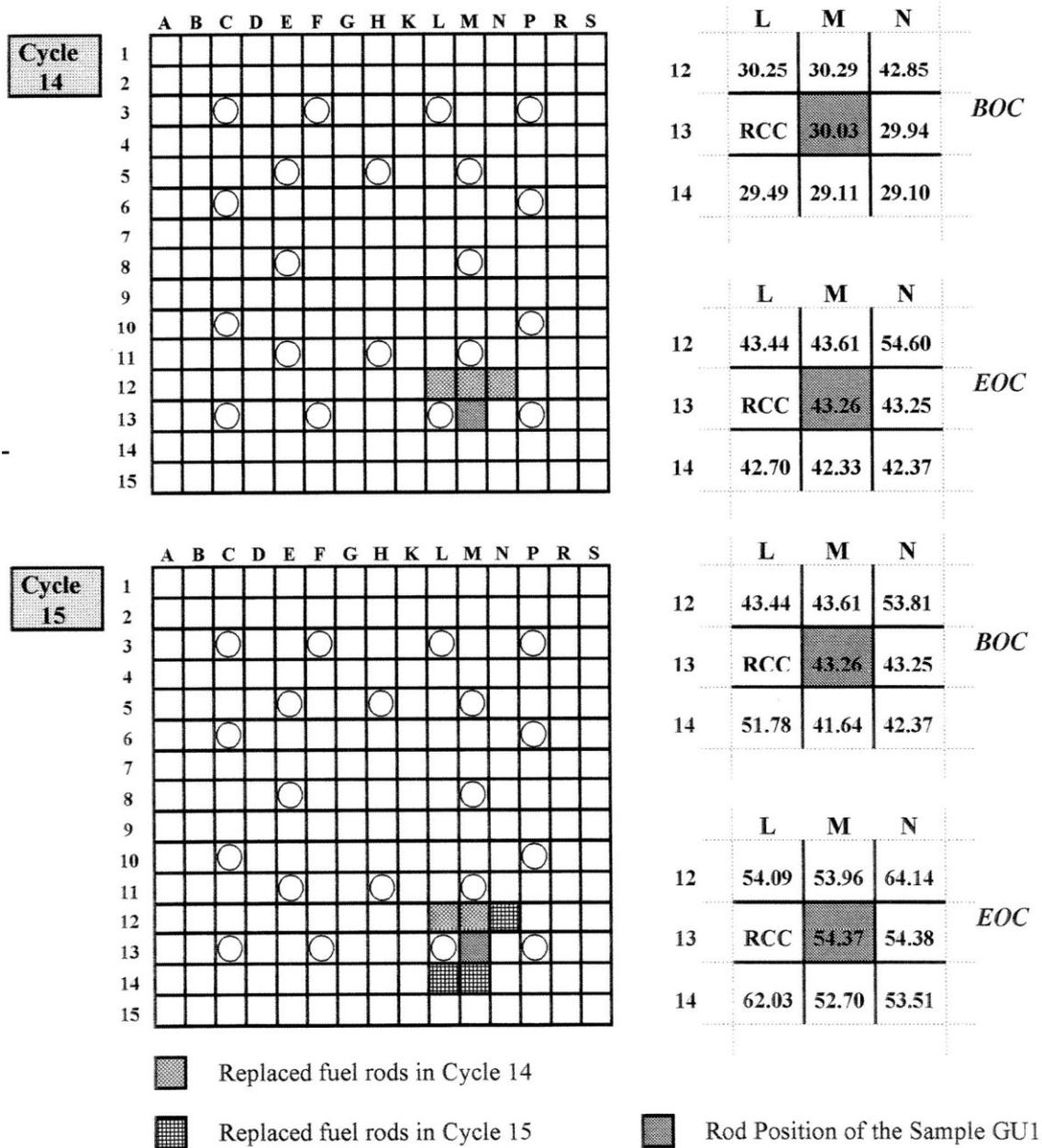
Wie bereits erwähnt, wurden auch beim Brennelement 1701 mit dem Einsetzen des Probenstabs zusätzlich drei weitere Brennstäbe ausgetauscht (Abb. 2.29). Die dadurch betroffenen Stabpositionen befinden sich zwar nicht direkt auf benachbarten Positionen, aber doch jeweils in „zweiter Reihe“ zum Probenstab. Zudem entstammen die eingesetzten Brennstäbe wie der Probenstab dem Brennelement 1601, womit sie etwa den doppelten Abbrand gegenüber den entfernten ursprünglichen Stäben des Brenn-

---

<sup>8</sup> In Abb. 2.30 wird zwar keine Einheit für die angegebenen Abbrandwerte genannt, aber der Vergleich zur Abbrandgeschichte des Brennelements 12-40 (Tab. 2.59) zeigt, dass es sich bei den in Abb. 2.30 gegebenen Werte um mittlere Stababbrände in GWd/tHM handeln dürfte.

elements 1701 aufweisen dürften. Welchen Positionen im Brennelement 1601 diese Stäbe entnommen wurden, geht aus den Informationen in /PRI 03/ nicht hervor.

Fuel Rod Scheme of the Gösgen 15x15 - 20 Fuel Assembly Burn-up Distribution :



**Abb. 2.30** Tausch von Brennstäben im Brennelement 12-40 mit den jeweiligen Stababbränden nach /PRI 03/

### Experimentelle Messergebnisse

Die Messungen der Nuklidkonzentrationen im bestrahlten Brennstoff und die dabei erzielten Resultate sind in /PRI 03/ in verschiedener Form zusammengefasst. Experimentell untersucht wurden insgesamt 18 bzw. 20 Nuklide der Aktinoiden Uran, Plutoni-

um, Americium, Neptunium und Curium, zudem insgesamt zwölf Nuklide der Abbrandindikatoren Neodym, Cäsium und Cer, sowie 22 bzw. 21 Nuklide der stark neutronenabsorbierenden Spaltprodukte. Für die Proben GU3 und GU4 wurden die entsprechenden Messungen am Institut für Transurane (ITU) und für die Proben GU1 und GU3' am SCK•CEN durchgeführt. Neben den chemischen Verfahren zur Auflösung des Brennstoffs und der Trennung der verschiedenen Elemente erfolgten die Messungen der Nuklidkonzentrationen am ITU hauptsächlich mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS), zumeist mit vorgeschalteter Ionenchromatographie zur Trennung der Elemente. Dagegen wurde am SCK•CEN für die Mehrzahl der vermessenen Nuklidkonzentrationen die Thermische Ionisations-Massenspektrometrie (TIMS) verwendet, in einzelnen Fällen kamen aber auch  $\alpha$ -,  $\beta$ - bzw.  $\gamma$ -Spektrometrie sowie ICP-MS zum Einsatz. Im Detail sind die verwendeten Messmethoden in Tab. 2.61 nuklidweise aufgeschlüsselt.

Letztlich gemessen wurden die Nuklidkonzentrationen in Form der jeweiligen Massenanteile der einzelnen Nuklide im bestrahlten Brennstoff, woraus zusätzlich die Massenverhältnisse der einzelnen Nuklide relativ zur Uranmasse im bestrahlten Brennstoff errechnet wurden. Neben dem Messzeitpunkt zur eigenständigen Zerfallsberücksichtigung wurden zudem die Massenverhältnisse auch auf das Bestrahlungsende des Brennelements zurückgerechnet und angegeben /PRI 03/. Zusätzlich sind für die Massenanteile der jeweiligen Nuklide im bestrahlten Brennstoff absolute bzw. relative Unsicherheiten abgeschätzt worden, die als 95%-Konfidenzintervall angegeben sind. Zusammengefasst sind diese Resultate in Tab. 2.62 und Tab. 2.63 zusammen mit dem jeweiligen Datum der Messung.

Die ARIANE-interne Konsistenzprüfung der Messungen der Proben GU3 am ITU und GU3' am SCK•CEN zeigte allerdings für verschiedene Nuklide deutliche Inkonsistenzen in den Resultaten auf. Hiervon waren insbesondere  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$  die Neodym-Isotope sowie einige weitere Spaltprodukte betroffen. Im Fall von  $^{243}\text{Am}$ , der Neodym-Isotope und  $^{106}\text{Ru}$  führten weitere Untersuchungen dazu, dass die betreffenden Messungen des ITU an der Probe GU3 als fehlerhaft verworfen wurden. Diese Messwerte sind in Tab. 2.63 in Rot angegeben.

**Tab. 2.61** Nuklidweise Zusammenstellung der verwendeten Messmethoden für die Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 /PRI 03/

Nuklid	Messmethode			
	GU1 (SCK•CEN)	GU3 (ITU)	GU3' (SCK•CEN)	GU4 (ITU)
<sup>232</sup> U	ICP-MS <sup>1</sup>	TIMS <sup>1</sup>	ICP-MS <sup>1</sup>	TIMS <sup>1</sup>
<sup>234</sup> U	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>235</sup> U	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>236</sup> U	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>238</sup> U	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>237</sup> Np	γ-Spec <sup>1</sup>	IC-ICP-MS	ICP-MS	IC-ICP-MS
<sup>238</sup> Pu	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>239</sup> Pu	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>240</sup> Pu	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>241</sup> Pu	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>242</sup> Pu	TIMS	TIMS	TIMS	TIMS
<sup>244</sup> Pu	TIMS	_2	TIMS	_2
<sup>241</sup> Am	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>242(m)</sup> Am	TIMS	IC-ICP-MS <sup>1</sup>	TIMS	IC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>243</sup> Am	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>242</sup> Cm	α-Spec	IC-ICP-MS <sup>1</sup>	α-Spec	IC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>243</sup> Cm	γ-Spec	IC-ICP-MS <sup>1</sup>	γ-Spec	IC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>244</sup> Cm	α-Spec	IC-ICP-MS	α-Spec	IC-ICP-MS
<sup>245</sup> Cm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>246</sup> Cm	TIMS	_2	TIMS	_2
<sup>142</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>143</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>144</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>145</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>146</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>148</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>150</sup> Nd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>147</sup> Pm	β-Spec	IC-ICP-MS	β-Spec	IC-ICP-MS
<sup>147</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>148</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>149</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>150</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS

Nuklid	Messmethode			
	GU1 (SCK•CEN)	GU3 (ITU)	GU3' (SCK•CEN)	GU4 (ITU)
<sup>151</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>152</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>154</sup> Sm	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>151</sup> Eu	TIMS	– <sup>2</sup>	TIMS	– <sup>2</sup>
<sup>153</sup> Eu	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>154</sup> Eu	γ-Spec	IC-ICP-MS	γ-Spec	IC-ICP-MS
<sup>155</sup> Eu	γ-Spec	IC-ICP-MS	γ-Spec	IC-ICP-MS
<sup>155</sup> Gd	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>133</sup> Cs	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>134</sup> Cs	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>135</sup> Cs	TIMS	IC-ICP-MS	TIMS	IC-ICP-MS
<sup>137</sup> Cs	γ-Spec	IC-ICP-MS	γ-Spec	IC-ICP-MS
<sup>90</sup> Sr	β-Spec	IC-ICP-MS	β-Spec	IC-ICP-MS
<sup>95</sup> Mo	ICP-MS	IC-ICP-MS	ICP-MS	IC-ICP-MS
<sup>99</sup> Tc	ICP-MS	IC-ICP-MS	ICP-MS	IC-ICP-MS
<sup>101</sup> Ru	ICP-MS	IC-ICP-MS	ICP-MS	IC-ICP-MS
<sup>106</sup> Ru	γ-Spec	IC-ICP-MS	γ-Spec	IC-ICP-MS
<sup>103</sup> Rh	ICP-MS	IC-ICP-MS	ICP-MS	IC-ICP-MS
<sup>109</sup> Ag	ICP-MS	IC-ICP-MS <sup>3</sup>	ICP-MS	IC-ICP-MS
<sup>125</sup> Sb	γ-Spec	IC-ICP-MS <sup>1</sup>	γ-Spec	IC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>129</sup> I	– <sup>2</sup>	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>144</sup> Ce	γ-Spec	IC-ICP-MS	γ-Spec	IC-ICP-MS

<sup>1</sup> Kein Resultat, da Nuklidkonzentration unterhalb der Nachweisschwelle.

<sup>2</sup> Nicht gemessen.

<sup>3</sup> Nicht messbar.

**Tab. 2.62** Gemessene Massenverhältnisse im bestrahlten Brennstoff zum Messzeitpunkt für die Proben GU1 (SCK•CEN) und GU4 (ITU) /PRI 03/

Die Angaben beziehen sich auf die Gesamtmasse des bestrahlten Brennstoffs bzw. den Massenanteil von  $^{238}\text{U}$  im bestrahlten Brennstoff. Die angegebenen Unsicherheiten entsprechen einem 95%-Konfidenzintervall ( $2\sigma$ ).

Nuklid	Probe GU1			Probe GU4		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
$^{234}\text{U}$	09.04.1997	$0,106 \pm 0,005_{2\sigma}$	0,130	20.05.1999	$0,172 \pm 0,001_{2\sigma}$	0,202
$^{235}\text{U}$	09.04.1997	$1,86 \pm 0,04_{2\sigma}$	2,27	20.05.1999	$12,8 \pm 0,1_{2\sigma}$	15,1
$^{236}\text{U}$	09.04.1997	$4,26 \pm 0,03_{2\sigma}$	5,22	20.05.1999	$4,05 \pm 0,04_{2\sigma}$	4,77
$^{238}\text{U}$	09.04.1997	$811 \pm 3_{2\sigma}$	992	20.05.1999	$832 \pm 1_{2\sigma}$	980,0
$^{237}\text{Np}$	–	–	–	16.06.1999	$0,463 \pm 0,022_{2\sigma}$	0,545
$^{238}\text{Pu}$	22.04.1997	$0,400 \pm 0,012_{2\sigma}$	0,490	17.08.1999	$0,098 \pm 0,002_{2\sigma}$	0,115
$^{239}\text{Pu}$	22.04.1997	$4,31 \pm 0,02_{2\sigma}$	5,27	17.08.1999	$4,55 \pm 0,02_{2\sigma}$	5,36
$^{240}\text{Pu}$	22.04.1997	$2,80 \pm 0,02_{2\sigma}$	3,43	17.08.1999	$1,62 \pm 0,01_{2\sigma}$	1,91
$^{241}\text{Pu}$	22.04.1997	$1,27 \pm 0,01_{2\sigma}$	1,56	17.08.1999	$0,87 \pm 0,03_{2\sigma}$	1,03
$^{242}\text{Pu}$	22.04.1997	$1,37 \pm 0,01_{2\sigma}$	1,67	17.08.1999	$0,273 \pm 0,002_{2\sigma}$	0,322
$^{244}\text{Pu}$	22.04.1997	$2,58\text{E}+04 \pm 1,29\text{E}+04_{2\sigma}$	$3,16\text{E}+04$	–	–	–
$^{241}\text{Am}$	09.04.1997	$0,219 \pm 0,008_{2\sigma}$	0,268	16.06.1999	$0,130 \pm 0,015_{2\sigma}$	0,153
$^{242(m)}\text{Am}$	09.04.1997	$6,04\text{E}+04 \pm 0,64\text{E}+04_{2\sigma}$	$7,40\text{E}+04$	–	–	–
$^{243}\text{Am}$	09.04.1997	$0,355 \pm 0,013_{2\sigma}$	0,435	16.06.1999	$0,0386 \pm 0,0051_{2\sigma}$	0,0455
$^{242}\text{Cm}$	04.06.1997	$2,72\text{E}+04 \pm 0,20\text{E}+04_{2\sigma}$	$3,33\text{E}+04$	–	–	–
$^{243}\text{Cm}$	04.06.1997	$2,98\text{E}+04 \pm 2,19\text{E}+04_{2\sigma}$	$3,65\text{E}+04$	–	–	–

Nuklid	Probe GU1			Probe GU4		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>244</sup> Cm	04.06.1997	0,215 ± 0,006 <sub>2σ</sub>	0,263	16.06.1999	0,0109 ± 0,0003 <sub>2σ</sub>	0,0129
<sup>245</sup> Cm	04.06.1997	0,0154 ± 0,0009 <sub>2σ</sub>	0,0188	16.06.1999	5,06E+04 ± 1,03E+04	5,96E+04
<sup>246</sup> Cm	04.06.1997	0,00466 ± 0,00094 <sub>2σ</sub>	0,00571	–	–	–
<sup>142</sup> Nd	09.04.1997	0,0597 ± 0,0060 <sub>2σ</sub>	0,0730	30.09.1999	0,0106 ± 0,0011 <sub>2σ</sub>	0,0125
<sup>143</sup> Nd	09.04.1997	0,822 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,01	30.09.1999	0,760 ± 0,094 <sub>2σ</sub>	0,896
<sup>144</sup> Nd	09.04.1997	2,32 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	2,85	30.09.1999	1,08 ± 0,13 <sub>2σ</sub>	1,27
<sup>145</sup> Nd	09.04.1997	0,918 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,12	30.09.1999	0,596 ± 0,070 <sub>2σ</sub>	0,702
<sup>146</sup> Nd	09.04.1997	1,17 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	1,43	30.09.1999	0,573 ± 0,084 <sub>2σ</sub>	0,675
<sup>148</sup> Nd	09.04.1997	0,587 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,719	30.09.1999	0,306 ± 0,041 <sub>2σ</sub>	0,360
<sup>150</sup> Nd	09.04.1997	0,299 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,366	30.09.1999	0,139 ± 0,019 <sub>2σ</sub>	0,163
<sup>147</sup> Pm	29.04.1997	0,0561 ± 0,0058 <sub>2σ</sub>	0,0687	01.10.1999	0,0963 ± 0,0130 <sub>2σ</sub>	0,113
<sup>147</sup> Sm	23.04.1997	0,196 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,240	01.10.1999	0,142 ± 0,030 <sub>2σ</sub>	0,167
<sup>148</sup> Sm	23.04.1997	0,286 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,350	01.10.1999	0,0974 ± 0,0078 <sub>2σ</sub>	0,115
<sup>149</sup> Sm	23.04.1997	0,00289 ± 0,00006 <sub>2σ</sub>	0,00354	01.10.1999	0,00266 ± 0,00031 <sub>2σ</sub>	0,00314
<sup>150</sup> Sm	23.04.1997	0,448 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,548	01.10.1999	0,214 ± 0,015 <sub>2σ</sub>	0,252
<sup>151</sup> Sm	23.04.1997	0,0115 ± 0,0001 <sub>2σ</sub>	0,0141	01.10.1999	0,00994 ± 0,00044 <sub>2σ</sub>	0,0117
<sup>152</sup> Sm	23.04.1997	0,146 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,179	01.10.1999	0,0834 ± 0,0053 <sub>2σ</sub>	0,0982
<sup>154</sup> Sm	23.04.1997	0,0709 ± 0,0005 <sub>2σ</sub>	0,0868	01.10.1999	0,0233 ± 0,0026 <sub>2σ</sub>	0,0275
<sup>151</sup> Eu	23.04.1997	6,33E+04 ± 0,13E+04 <sub>2σ</sub>	7,75E+04	–	–	–
<sup>153</sup> Eu	23.04.1997	0,185 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,226	04.10.1999	0,0828 ± 0,0091 <sub>2σ</sub>	0,0976
<sup>154</sup> Eu	23.04.1997	0,0284 ± 0,0011 <sub>2σ</sub>	0,0348	04.10.1999	0,0122 ± 0,0029 <sub>2σ</sub>	0,0144

Nuklid	Probe GU1			Probe GU4		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>155</sup> Eu	23.04.1997	0,00995 ± 0,00053 <sub>2σ</sub>	0,0122	04.10.1999	0,00388 ± 0,00028 <sub>2σ</sub>	0,00457
<sup>155</sup> Gd	20.04.1997	0,00496 ± 0,00025 <sub>2σ</sub>	0,00607	04.10.1999	0,00233 ± 0,00032 <sub>2σ</sub>	0,00274
<sup>133</sup> Cs	30.05.1997	1,52 ± 0,07 <sub>2σ</sub>	1,86	06.10.1999	0,954 ± 0,031 <sub>2σ</sub>	1,12
<sup>134</sup> Cs	30.05.1997	0,0956 ± 0,0047 <sub>2σ</sub>	0,117	06.10.1999	0,0365 ± 0,0009 <sub>2σ</sub>	0,0430
<sup>135</sup> Cs	30.05.1997	0,455 ± 0,022 <sub>2σ</sub>	0,557	06.10.1999	0,329 ± 0,008 <sub>2σ</sub>	0,388
<sup>137</sup> Cs	30.05.1997	1,79 ± 0,09 <sub>2σ</sub>	2,19	06.10.1999	0,877 ± 0,026 <sub>2σ</sub>	1,03
<sup>90</sup> Sr	24.06.1997	0,857 ± 0,129 <sub>2σ</sub>	1,05	15.11.1999	0,445 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,525
<sup>95</sup> Mo	10.04.2000	1,08 ± 0,08 <sub>2σ</sub>	1,32	15.11.1999	0,680 ± 0,021 <sub>2σ</sub>	0,801
<sup>99</sup> Tc	10.04.2000	1,10 ± 0,14 <sub>2σ</sub>	1,35	15.11.1999	0,528 ± 0,012 <sub>2σ</sub>	0,623
<sup>101</sup> Ru	10.04.2000	1,14 ± 0,10 <sub>2σ</sub>	1,40	15.11.1999	0,660 ± 0,026 <sub>2σ</sub>	0,778
<sup>106</sup> Ru	28.02.1997	0,0351 ± 0,0020 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,0431	15.11.1999	0,0218 ± 0,0012 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,0256
<sup>103</sup> Rh	10.04.2000	0,54 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	0,662	15.11.1999	0,400 ± 0,019 <sub>2σ</sub>	0,470
<sup>109</sup> Ag	10.04.2000	0,0662 ± 0,0069 <sub>2σ</sub>	0,0812	–	–	–
<sup>125</sup> Sb	28.02.1997	0,00411 ± 0,00042 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,00504	–	–	–
<sup>129</sup> I	–	–	–	09.12.1999	0,146 ± 0,034 <sub>2σ</sub>	0,173
<sup>144</sup> Ce	28.02.1997	0,0297 ± 0,0023 <sub>2σ</sub>	0,0363	30.09.1999	0,0320 ± 0,0024 <sub>2σ</sub>	0,0377

<sup>1</sup> Dieses Massenverhältnis zum Messzeitpunkt ist in /PRI 03/ nur für die „main solution“ und ohne Unsicherheit gegeben. Hier aufgeführte Werte wurden aus den Verhältnissen der Massenteile im Brennstoff zum Messzeitpunkt in der „main solution“ und in der Summe aus „main solution“ und „residue solution“ errechnet

<sup>2</sup> Massenanteil ist in /PRI 03/ nur zum Zeitpunkt des Bestrahlungsendes angegeben. Hier aufgeführter Wert zum Messzeitpunkt wurde mit dem Verhältnis der gegebenen Massenteile in der „main solution“ zum Messzeitpunkt und zum Bestrahlungsende zurückgerechnet.

**Tab. 2.63** Gemessene Massenverhältnisse im bestrahlten Brennstoff zum Messzeitpunkt für die Proben GU3 (ITU) und GU3' (SCK•CEN) /PRI 03/

Die Angaben beziehen sich auf die Gesamtmasse des bestrahlten Brennstoffs bzw. den Massenanteil von <sup>238</sup>U im bestrahlten Brennstoff. Die angegebenen Unsicherheiten entsprechen einem 95%-Konfidenzintervall (2σ).

Nuklid	Probe GU3			Probe GU3'		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>234</sup> U	28.01.1999	0,124 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,150	12.10.1999	0,124 ± 0,006 <sub>2σ</sub>	0,150
<sup>235</sup> U	28.01.1999	5,31 ± 0,13 <sub>2σ</sub>	6,42	12.10.1999	5,33 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	6,45
<sup>236</sup> U	28.01.1999	4,99 ± 0,08 <sub>2σ</sub>	6,03	12.10.1999	4,97 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	6,02
<sup>238</sup> U	28.01.1999	817 ± 1 <sub>2σ</sub>	987	12.10.1999	816 ± 3 <sub>2σ</sub>	987
<sup>237</sup> Np	16.06.1999	0,727 ± 0,070 <sub>2σ</sub>	0,878	22.12.1999	0,709 ± 0,054 <sub>2σ</sub>	0,858
<sup>238</sup> Pu	28.01.1999	0,328 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,396	11.10.1999	0,332 ± 0,010 <sub>2σ</sub>	0,402
<sup>239</sup> Pu	28.01.1999	5,11 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	6,18	11.10.1999	5,13 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	6,20
<sup>240</sup> Pu	28.01.1999	2,50 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	3,02	11.10.1999	2,50 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	3,02
<sup>241</sup> Pu	28.01.1999	1,48 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	1,79	11.10.1999	1,43 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	1,74
<sup>242</sup> Pu	28.01.1999	0,895 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	1,08	11.10.1999	0,893 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,08
<sup>244</sup> Pu	–	–	–	11.10.1999	1,63E-04 ± 0,81E-04 <sub>2σ</sub>	1,97E-04
<sup>241</sup> Am	16.06.1999	0,167 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,202	21.12.1999	0,197 ± 0,007 <sub>2σ</sub>	0,238
<sup>242(m)</sup> Am	–	–	–	21.12.1999	8,10E-04 ± 0,86E-04 <sub>2σ</sub>	9,80E-04
<sup>243</sup> Am	16.06.1999	0,236 ± 0,009 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,286	21.12.1999	0,210 ± 0,007 <sub>2σ</sub>	0,254
<sup>242</sup> Cm	–	–	–	01.07.1999	9,82E-04 ± 0,40E-04 <sub>2σ</sub>	0,00119
<sup>243</sup> Cm	–	–	–	01.07.1999	5,23E-04 ± 1,01E-04 <sub>2σ</sub>	6,33E-04
<sup>244</sup> Cm	16.06.1999	0,136 ± 0,017 <sub>2σ</sub>	0,164	01.07.1999	0,114 ± 0,004 <sub>2σ</sub>	0,138

Nuklid	Probe GU3			Probe GU3'		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>245</sup> Cm	16.06.1999	0,0102 ± 0,0003 <sub>2σ</sub>	0,0123	01.07.1999	0,00854 ± 0,00044 <sub>2σ</sub>	0,0103
<sup>246</sup> Cm	–	–	–	01.07.1999	0,00127 ± 0,00013 <sub>2σ</sub>	0,00153
<sup>142</sup> Nd	26.03.1999	0,0319 ± 0,0005 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,0386	24.11.1999	0,0373 ± 0,0037 <sub>2σ</sub>	0,0452
<sup>143</sup> Nd	26.03.1999	0,876 ± 0,035 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	1,06	24.11.1999	0,945 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,140
<sup>144</sup> Nd	26.03.1999	1,75 ± 0,07 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	2,11	24.11.1999	1,89 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	2,29
<sup>145</sup> Nd	26.03.1999	0,822 ± 0,035 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,993	24.11.1999	0,872 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,06
<sup>146</sup> Nd	26.03.1999	0,958 ± 0,035 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	1,16	24.11.1999	1,01 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	1,22
<sup>148</sup> Nd	26.03.1999	0,494 ± 0,012 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,596	24.11.1999	0,517 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,626
<sup>150</sup> Nd	26.03.1999	0,254 ± 0,007 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,307	24.11.1999	0,252 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,305
<sup>147</sup> Pm	04.05.1999	0,141 ± 0,003 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,170	03.03.2000	0,0825 ± 0,0148 <sub>2σ</sub>	0,0998
<sup>147</sup> Sm	04.05.1999	0,163 ± 0,018 <sub>2σ</sub>	0,197	13.12.1999	0,173 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,209
<sup>148</sup> Sm	04.05.1999	0,231 ± 0,018 <sub>2σ</sub>	0,279	13.12.1999	0,224 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,271
<sup>149</sup> Sm	04.05.1999	0,00407 ± 0,00175 <sub>2σ</sub>	0,00492	13.12.1999	0,00296 ± 0,00006 <sub>2σ</sub>	0,00359
<sup>150</sup> Sm	04.05.1999	0,394 ± 0,018 <sub>2σ</sub>	0,476	13.12.1999	0,393 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,476
<sup>151</sup> Sm	04.05.1999	0,0129 ± 0,0087 <sub>2σ</sub>	0,0156	13.12.1999	0,0127 ± 0,0001 <sub>2σ</sub>	0,0154
<sup>152</sup> Sm	04.05.1999	0,115 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	0,139	13.12.1999	0,118 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,143
<sup>154</sup> Sm	04.05.1999	0,0469 ± 0,0035 <sub>2σ</sub>	0,0566	13.12.1999	0,0506 ± 0,0003 <sub>2σ</sub>	0,0612
<sup>151</sup> Eu	–	–	–	01.07.1999	3,70E-04 ± 0,08E+04 <sub>2σ</sub>	4,48E-04
<sup>153</sup> Eu	04.05.1999	0,165 ± 0,007 <sub>2σ</sub>	0,199	01.07.1999	0,162 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,197
<sup>154</sup> Eu	04.05.1999	0,0327 ± 0,0005 <sub>2σ</sub>	0,0395	01.07.1999	0,0306 ± 0,0016 <sub>2σ</sub>	0,037
<sup>155</sup> Eu	04.05.1999	0,0109 ± 0,0035 <sub>2σ</sub>	0,0131	01.07.1999	0,00997 ± 0,00098 <sub>2σ</sub>	0,0121

Nuklid	Probe GU3			Probe GU3'		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>155</sup> Gd	06.10.1999	0,00367 ± 0,00023 <sub>2σ</sub>	0,00443	01.12.1999	0,00341 ± 0,00007 <sub>2σ</sub>	0,00413
<sup>133</sup> Cs	04.05.1999	1,47 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	1,78	01.07.1999	1,39 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	1,68
<sup>134</sup> Cs	04.05.1999	0,128 ± 0,011 <sub>2σ</sub>	0,154	01.07.1999	0,109 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,132
<sup>135</sup> Cs	04.05.1999	0,424 ± 0,014 <sub>2σ</sub>	0,512	01.07.1999	0,405 ± 0,012 <sub>2σ</sub>	0,490
<sup>137</sup> Cs	04.05.1999	1,58 ± 0,02 <sub>2σ</sub>	1,91	01.07.1999	1,59 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,92
<sup>90</sup> Sr	07.10.1999	0,645 ± 0,004 <sub>2σ</sub>	0,780	16.05.2000	0,630 ± 0,101 <sub>2σ</sub>	0,763
<sup>95</sup> Mo	07.10.1999	1,03 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	1,24	10.04.2000	1,15 ± 0,11 <sub>2σ</sub>	1,39
<sup>99</sup> Tc	07.10.1999	0,977 ± 0,039 <sub>2σ</sub>	1,18	10.04.2000	0,114 ± 0,020 <sub>2σ</sub>	1,38
<sup>101</sup> Ru	07.10.1999	1,07 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	1,29	10.04.2000	1,21 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	1,47
<sup>106</sup> Ru	07.10.1999	0,0903 ± 0,0065 <sub>2σ</sub> <sup>2,3</sup>	0,109	01.07.1999	0,0627 ± 0,0178 <sub>2σ</sub> <sup>3</sup>	0,0760
<sup>103</sup> Rh	07.10.1999	0,471 ± 0,027 <sub>2σ</sub>	0,569	10.04.2000	0,494 ± 0,048 <sub>2σ</sub>	0,599
<sup>109</sup> Ag	–	–	–	10.04.2000	0,105 ± 0,019 <sub>2σ</sub>	0,127
<sup>125</sup> Sb	–	–	–	01.07.1999	0,00394 ± 0,00074 <sub>2σ</sub> <sup>3</sup>	0,00476
<sup>129</sup> I	11.03.1999	0,231 ± 0,035 <sub>2σ</sub>	0,279	24.12.1999	0,239 ± 0,027 <sub>2σ</sub>	0,290
<sup>144</sup> Ce	03.05.1999	0,0713 ± 0,0018 <sub>2σ</sub>	0,0861	01.07.1999	0,0632 ± 0,0022 <sub>2σ</sub>	0,0765

<sup>1</sup> Dieses Massenverhältnis zum Messzeitpunkt ist in /PRI 03/ nur für die „main solution“ und ohne Unsicherheit gegeben. Hier aufgeführte Werte wurden aus den Verhältnissen der Massenteile im Brennstoff zum Messzeitpunkt in der „main solution“ und in der Summe aus „main solution“ und „residue solution“ errechnet.

<sup>2</sup> Wert nachträglich als fehlerhaft verworfen.

<sup>3</sup> Massenanteil ist in /PRI 03/ nur zum Zeitpunkt des Bestrahlungsendes angegeben. Hier aufgeführter Wert zum Messzeitpunkt wurde mit dem Verhältnis der gegebenen Massenteile in der „main solution“ zum Messzeitpunkt und zum Bestrahlungsende zurückgerechnet.

## 2.4.2 Modellierung

Aus den in Kap. 2.4.1 beschriebenen Daten wurden geeignete Rechenmodelle für die verschiedenen Proben erstellt, welche im Folgenden beschrieben werden. Aufgrund der nachträglich identifizierten Fehler in einzelnen Nuklidkonzentrationsmessungen des ITU an der Probe GU3 wurde hier auf einen Vergleich mit den Messdaten des ITU verzichtet und zunächst nur die Daten des SCK•CEN, d. h. der Probe GU3' genutzt.

Eine Besonderheit besteht hier bei der Nachrechnung der Proben GU3' und GU4 durch den Wechsel des Probenstabs nach zwei Zyklen (Zyklus 16 und 17) aus dem Brennelement 1601 in das Brennelement 1701 und dessen dortiger Bestrahlung für die Dauer eines weiteren Zyklus (Zyklus 18). Dabei ist zu beachten, dass das Brennelement 1701 bereits vor dem Zyklus 18 für einen Zyklus bestrahlt wurde. Um einen Stabwechsel in dieser Form zu modellieren, sind die Nachrechnung der Proben GU3' und GU4 in jeweils zwei Rechnungen mit eigenständigen Eingabedatensätzen zu untergliedern. In der jeweils ersten Rechnung beider Proben werden die Zyklen 16 und 17 mit dem Brennelement 1601 simuliert. Das dabei für den Probenstab errechnete Nuklidinventar wird ausgelesen und in den jeweils zweiten Eingabedatensatz als eigenständiges Material übertragen. Die zweiten Rechnungen simulieren dann die Zyklen des Brennelements 1701. Während dieser Rechnungen werden die zuvor errechneten Nuklidinventare des Probenstabs zu Beginn des zweiten Zyklus per Materialaustauschoption mit dem Material des entsprechenden Brennstabs ausgetauscht, an dessen Position der Probenstab eingebracht wurde, und die Rechnung entsprechend mit dem Material des Probenstabs vorgesetzt.

### Allgemeine Parameter

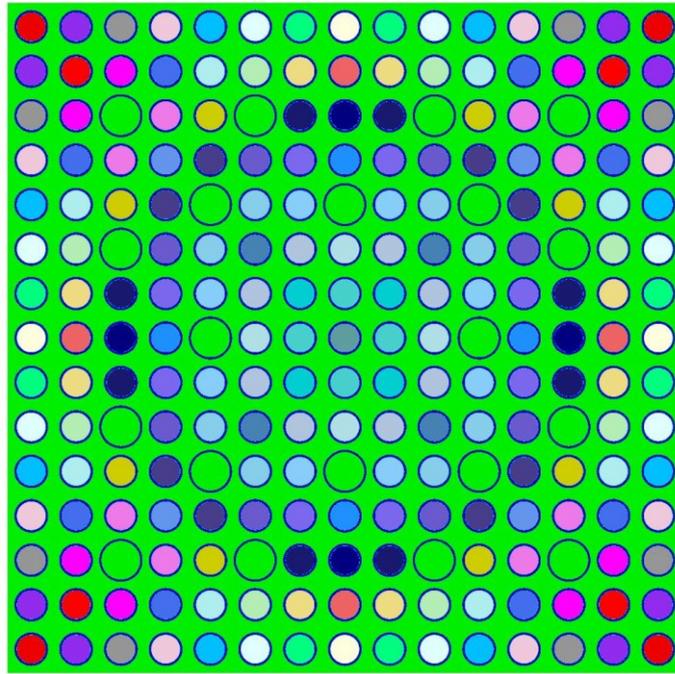
Für alle durchgeführten Nachrechnungen mit MOTIVE sind einheitliche allgemeine Parameter, wie Neutronentransport- und Inventarcode, Wirkungsquerschnittsbibliothek, Predictor-Corrector-Methode, etc. gewählt worden. Diese Werte sind in Tab. 2.13 zusammengestellt. Zudem ist eine Liste mit Nukliden anzugeben, für welche die errechneten Konzentrationen auszugeben werden sollen. Hier wurden die Nuklide gewählt, für welche Messdaten vorliegen (Tab. 2.62 und Tab. 2.63).

## Modellgeometrie

Die hier betrachteten Proben stammen aus nahezu baugleichen Brennelementen (Tab. 2.55), zudem sind die Proben GU3' und GU4 demselben Probenstab entnommen worden, so dass für die Probennachrechnungen mit Ausnahme der Unterschiede in den Pelletradien und in der Identifikation des jeweiligen Probenstabs identische Modellgeometrien verwendet wurden. Die Rechenmodelle besteht dabei in erster Linie aus einem unendlichen Gitter identischer Brennelemente, welches mithilfe eines einzelnen Brennelements mit reflektierenden Randbedingungen gebildet wurde. Das Modell ist dabei auf zwei Dimensionen beschränkt, d. h. in axialer Brennstabrichtung wurde das Modell nicht weiter unterteilt und ebenfalls durch reflektierende Randbedingungen abgeschlossen. Das jeweils verwendete Brennelement wurde gemäß Abb. 2.28 bzw. Abb. 2.29 modelliert und weist demzufolge eine 1/8-Spiegelsymmetrie auf. Die einzelnen Stäbe im Brennelement wurden separat modelliert, also durch eigene abzubrennende Materialien im Rechenmodell beschrieben, wobei Stäbe auf homologen Positionen zusammengefasst wurden. Auf diese Weise wurde unter Berücksichtigung der Spiegelsymmetrie jeweils 32 Brennstäbe in den Modellen separat betrachtet. Am Beispiel des Brennelements 12-40 (Probe GU1) zeigt Abb. 2.31 die sich daraus ergebende Brennstabbelegung. Dabei gibt die Zahl 1 den Probenstab, die Zahlen 11 bis 41 die übrigen Brennstäbe bzw. die abzubrennenden Materialien und die Zahlen 100 die Steuerstabführungsrohre wieder. Die Umsetzung dieses Rechenmodells in ein KENO-VI-Geometriemodell zeigt Abb. 2.32. Für die Brennelemente 1601 und 1701 ergeben sich analoge Brennstabbelegungen, die sich von Abb. 2.31 lediglich durch die Position des Probenstabs und einer demzufolge veränderten Nummerierung der Brennstäbe unterscheiden.

11	12	13	14	15	16	17	18	17	16	15	14	13	12	11
12	19	20	21	22	23	24	25	24	23	22	21	20	19	12
13	20	100	26	1	100	27	28	27	100	1	26	100	20	13
14	21	26	29	30	31	32	33	32	31	30	29	26	21	14
15	22	1	30	100	34	35	100	35	34	100	30	1	22	15
16	23	100	31	34	36	37	38	37	36	34	31	100	23	16
17	24	27	32	35	37	39	40	39	37	35	32	27	24	17
18	25	28	33	100	38	40	41	40	38	100	33	28	25	18
17	24	27	32	35	37	39	40	39	37	35	32	27	24	17
16	23	100	31	34	36	37	38	37	36	34	31	100	23	16
15	22	1	30	100	34	35	100	35	34	100	30	1	22	15
14	21	26	29	30	31	32	33	32	31	30	29	26	21	14
13	20	100	26	1	100	27	28	27	100	1	26	100	20	13
12	19	20	21	22	23	24	25	24	23	22	21	20	19	12
11	12	13	14	15	16	17	18	17	16	15	14	13	12	11

**Abb. 2.31** Brennstabbelegung im Rechenmodell für das Brennelement 12-40 aus dem Reaktor Gösgen



**Abb. 2.32** Schematische Darstellung des KENO-VI-Geometriemodells für das Brennelement 12-40 aus dem Reaktor Gösgen

Die geometrischen Abmessungen bzw. Abstände der Brennstäbe, Steuerstabführungsrohre und des Brennelements selbst sind entsprechend Tab. 2.55 modelliert worden. Der Zwischenraum („Gap“) zwischen Pellet und Hüllrohr wurde hier mit modelliert, d. h. auf eine Berücksichtigung des Anschwellens der Pellets während des Abbrands („Swelling“) wurde verzichtet.

### **Materialzusammensetzung**

Die Brennstoffzusammensetzungen wurden entsprechend den Angaben in Tab. 2.56 und Tab. 2.57 modelliert. Dabei wurde unterstellt, dass die Angaben der Brennstoffzusammensetzungen für alle Brennstäbe der Brennelemente gelten. Für die Brennstoffdichte wurde hier eine Dichte von  $10,244 \text{ g/cm}^3$  angenommen, welche der angegebenen linearen Massenbelegung von  $6,7 \text{ g/cm}$  entspricht, wodurch hier somit das angegebene Dish-Volumen von  $1,5 \%$  berücksichtigt wird. Aus den angegebenen gewichtsanteiligen Zusammensetzungen wurden die Kernzahldichten errechnet, wobei dazu für Sauerstoff das mittlere Atomgewicht entsprechend der natürlichen Isotopenzusammensetzung genutzt wurde. Im Rechenmodell wurde aber zur Vereinfachung der Sauerstoff als  $100 \%$   $^{16}\text{O}$  modelliert. Die verwendeten Zusammensetzungen sind im Einzelnen in Tab. 2.64 aufgeführt.

**Tab. 2.64** Verwendete nuklidweise Zusammensetzung der Brennstoffe der Brennelemente 12-40, 1601 und 1701 aus dem Reaktor Gösgen nach /PRI 03/

Element <sup>1</sup> / Isotop	Mittlere Atom-masse [u]	Brennelement 12-40		
		Anteil im Element		Kernzahldichte <sup>2</sup> [1/(barn*cm)]
		[wt.-%]	[at.-%]	
U	237,9428 <sup>3</sup>			2,2853E-02 <sup>4</sup>
<sup>234</sup> U	234,0409	0,036	0,0366	8,3642E-06
<sup>235</sup> U	235,0439	3,500	3,5432	8,0971E-04
<sup>238</sup> U	238,0508	96,464	96,4202	2,2035E-02
O	15,9994 <sup>3</sup>			4,5706E-02 <sup>4</sup>
Element <sup>1</sup> / Isotop	Mittlere Atom-masse [u]	Brennelemente 1601, 1701		
		Anteil im Element		Kernzahldichte <sup>2</sup> [1/(barn*cm)]
		[wt.-%]	[at.-%]	
U	237,9243 <sup>3</sup>			2,2854E-02 <sup>4</sup>
<sup>234</sup> U	234,0409	0,042	0,0427	9,7581E-06
<sup>235</sup> U	235,0439	4,100	4,1502	9,4851E-04
<sup>238</sup> U	238,0508	95,858	95,8071	2,1896E-02
O	15,9994 <sup>3</sup>			4,5709E-02 <sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Sauerstoff wurde bei der Berechnung der Kernzahldichten als Element behandelt und nicht nuklidweise unterschieden; im Rechenmodell wurde es zu 100 % <sup>16</sup>O mit der gegebenen Kernzahldichte modelliert.
- <sup>2</sup> Die berücksichtigten nuklidweisen Brennstoffzusammensetzungen sind durch die hellblau unterlegten Einträge gegeben.
- <sup>3</sup> Mittleres Atomgewicht des jeweiligen Elements.
- <sup>4</sup> Kernzahldichte des jeweiligen Elements (= Summe der Kernzahldichten der Isotope).

Das Hüllrohrmaterial ist laut /PRI 03/ Zircaloy-4, ohne dass dort aber eine Zusammensetzung angegeben wurde. Daher wird hier die Zusammensetzung des Zircaloy-4 aus der SCALE Standard Composition Library /PET 16/ mit der dort angegebenen Dichte von 6,56 g/cm<sup>3</sup> übernommen. Die konkrete verwendete Zusammensetzung ist in Tab. 2.65 angegeben.

In Ermangelung entsprechender Informationen wurde angenommen, dass das Hüllrohr mit 30 bar Helium beaufschlagt wurde. Dementsprechend wurde im Rechenmodell Helium mit einer Kernzahldichte von 7,4122E-04 als Material im Zwischenraum zwischen Pellet und Hüllrohr („Gap“) eingesetzt. Für die Berechnung der Kernzahldichte wurde die natürliche Isotopenzusammensetzung des Heliums mit dem daraus resultierenden mittleren Atomgewicht genutzt, im Rechenmodell wurde aber zur Vereinfachung das Helium als reines <sup>4</sup>He mit der genannten Kernzahldichte angenommen.

**Tab. 2.65** Im Rechenmodell verwendete nuklidweise Zusammensetzung von Zirkaloy-4 nach /PET 16/

Zusammensetzung Zirkaloy-4		Natürliche Elementzusammensetzung			Nuklidweise Zusammensetzung Zirkaloy-4 <sup>1</sup> [1/(barn*cm)]
Element	Anteil [wt.-%]	Isotop	Anteil im Element [at.-%]	Atomgewicht [u]	
Zirkonium	98,23			91,2236 <sup>2</sup>	4,254E-02 <sup>3</sup>
		<sup>90</sup> Zr	51,45	89,9047	2,189E-02
		<sup>91</sup> Zr	11,22	90,9056	4,773E-03
		<sup>92</sup> Zr	17,15	91,9050	7,296E-03
		<sup>94</sup> Zr	17,38	93,9063	7,393E-03
		<sup>96</sup> Zr	2,80	95,9083	1,191E-03
Zinn	1,45			118,7101 <sup>2</sup>	4,825E-04 <sup>3</sup>
		<sup>112</sup> Sn	0,97	111,9048	4,681E-06
		<sup>114</sup> Sn	0,66	113,9028	3,185E-06
		<sup>115</sup> Sn	0,34	114,9033	1,641E-06
		<sup>116</sup> Sn	14,54	115,9017	7,016E-05
		<sup>117</sup> Sn	7,68	116,903	3,706E-05
		<sup>118</sup> Sn	24,22	117,9016	1,169E-04
		<sup>119</sup> Sn	8,59	118,9033	4,145E-05
		<sup>120</sup> Sn	32,58	119,9022	1,572E-04
		<sup>122</sup> Sn	4,63	121,9034	2,234E-05
<sup>124</sup> Sn	5,79	123,9053	2,794E-05		
Eisen	0,21			55,8451 <sup>2</sup>	1,486E-04 <sup>3</sup>
		<sup>54</sup> Fe	5,845	53,9396	8,683E-06
		<sup>56</sup> Fe	91,754	55,9349	1,363E-04
		<sup>57</sup> Fe	2,119	56,9354	3,148E-06
		<sup>58</sup> Fe	0,282	57,9333	4,189E-07
Chrom	0,10			51,9961 <sup>2</sup>	7,598E-05 <sup>3</sup>
		<sup>50</sup> Cr	4,345	49,9461	3,301E-06
		<sup>52</sup> Cr	83,789	51,9405	6,366E-05
		<sup>53</sup> Cr	9,501	52,9407	7,219E-06
		<sup>54</sup> Cr	2,365	53,9389	1,797E-06
Hafnium	0,01			178,4849 <sup>2</sup>	2,213E-06 <sup>3</sup>
		<sup>174</sup> Hf	0,16	173,9400	3,541E-09
		<sup>176</sup> Hf	5,26	175,9414	1,164E-07
		<sup>177</sup> Hf	18,60	176,9432	4,117E-07
		<sup>178</sup> Hf	27,28	177,9437	6,038E-07
		<sup>179</sup> Hf	13,62	178,9458	3,015E-07
		<sup>180</sup> Hf	35,08	179,9465	7,764E-07

<sup>1</sup> Die nuklidweise Zusammensetzung von Zirkaloy-4 ist durch die hellblau unterlegten Einträge gegeben.

<sup>2</sup> Mittleres Atomgewicht des jeweiligen Elements.

<sup>3</sup> Kernzahldichte des jeweiligen Elements (= Summe der Kernzahldichten der Isotope).

## Bestrahlungsgeschichte

Zur Modellierung der Bestrahlungsgeschichte, also des zeitlichen Verlaufs von Leistung, Brennstofftemperatur, Hüllrohrtemperatur, Moderatortemperatur und Borkonzentration, wurden in erster Linie die Werte aus Tab. 2.59 bzw. Tab. 2.60 herangezogen. Die dort vorgegebene zeitliche Unterteilung der Daten wurde für die Nachrechnung übernommen. Es wurde lediglich der erste Zeitschritt nochmals geteilt, so dass ein zusätzlicher kurzer Zeitschritt von 0,1 Tag zu Beginn jedes Zyklus entstand. Bei Verwendung der gegebenen Bestrahlungsdaten ist aber zu beachten, dass es sich hierbei nicht um zeitintervallgemittelte Werte, sondern um Werte zu einem gegebenen Zeitpunkt handelt (vgl. Kap. 2.4.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“), wohingegen für Probennachrechnungen in der Regel zeitintervallgemittelte Werte erforderlich bzw. zu empfehlen sind. Daher wurden für die Leistungsverläufe und Borkonzentrationen nicht direkt die angegebenen Daten verwendet, sondern aus ihnen zeitintervallgemittelte Werte errechnet und diese für die Nachrechnungen herangezogen. Ferner ist zu beachten, dass keine Angaben zum ersten Zyklus des Brennelements 1701 vorliegen, lediglich der mittlere Brennelementabbrand zu Beginn des Zyklus 18 ist bekannt (Tab. 2.60). Um dennoch für die Nachrechnung die notwendigen Eingabedaten zur Simulation dieses ersten Zyklus von Brennelement 1701 zu erhalten, wurden hier der Einfachheit halber die Bestrahlungsdaten des Zyklus 17 mit einem an den zu erzielenden Abbrand angepassten Leistungsverlauf herangezogen. Es wird so also unterstellt, dass das Brennelement 1701 im Zyklus 17 im Reaktor eingesetzt wurden.

Im Einzelnen wurden für die Simulation der Leistungsverläufe aus den gegebenen zeitabhängigen Probenabbränden mittlere Probenstableistungen in den Intervallen zwischen den aufgeführten Zeitpunkten errechnet und diese für die Nachrechnung genutzt. Die so erzielten Leistungswerte des Zyklus 17 wurden für das Brennelement 1701 zusätzlich mit dem Verhältnis des mittleren Abbrands nach dem ersten Zyklus vom Brennelement 1701 und dem Zuwachs im mittleren Abbrand des Brennelements 1601 im Zyklus 17 skaliert, d. h. mit etwa einem Faktor 1,135 (Tab. 2.60). Um den messtechnisch ermittelten Endabbrand der Proben in den Abbrandrechnungen zu erzielen, wurden die so abgeleiteten Leistungswerte probenweise mit einem über die gesamte Leistungsgeschichte konstanten Faktor skaliert, so dass jeweils die für den Abbrandindikator  $^{148}\text{Nd}$  rechnerisch erzielte Nuklidkonzentration mit dem jeweiligen für die Probe gemessenen Wert innerhalb von 0,2 % übereinstimmt. Im Fall der Proben GU3' und GU4 wurde dieser Skalierungsfaktor insbesondere auf die Leistungsverläufe bei-

der Brennelemente (1601 und 1701) angewandt, d. h. auch auf den ersten Zyklus des Brennelements 1701, um eine konsistente Abbranddefinition zu erhalten.

Ebenso wurden aus den gegebenen zeitabhängigen Borkonzentrationen mittlere Konzentrationen errechnet. Dazu wurde unterstellt, dass sich die Borkonzentrationen zwischen den gegebenen Zeitpunkten linear ändern und daraus jeweils die mittleren Konzentrationen für die in den Nachrechnungen berücksichtigten Zeitintervalle errechnet und in den Nachrechnungen genutzt.

Dagegen wurden die Brennstoff- und Moderatortemperaturen wie in /PRI 03/ angegeben für die Nachrechnungen verwendet. Dazu wurden diese Temperaturen ab dem gegebenen Zeitpunkt bis zum nächsten aufgeführten Zeitpunkt als konstant unterstellt. In diesem Fall ist nicht zu erwarten, dass eine Mittelung bzw. Interpolation zwingend zu realistischeren Werten führt, da insbesondere die Brennstofftemperaturen wesentlich von den lokalen Stableistungen abhängen, letztere aber unabhängig von den gegebenen Probenleistungen für die Nachrechnungen neu bestimmt wurden. Dementsprechend wäre hier eine Neubestimmung der Brennstofftemperaturen notwendig, auf die zur Vereinfachung zunächst verzichtet wurde. Im Fall der Moderatortemperaturen sind nur geringfügige Änderungen zu beobachten, so dass hier eine Mittelung oder Interpolation zu keinen wesentlich anderen Werten führen würde. Für den ersten Zyklus des Brennelements 1701 wurde ebenfalls zur Vermeidung einer Bestimmung der Brennstofftemperaturen die Temperaturwerte des Brennelements 1601 für den Zyklus 17 übernommen, auch wenn hier die gleiche Argumentation bzgl. der Gültigkeit der Brennstofftemperaturen gilt.

Die so resultierenden Bestrahlungsgeschichten sind in Tab. 2.66 und Tab. 2.67 zusammengefasst. Die dort angegebenen relativen Leistungen je Zeitschritt beziehen sich auf das Maximum der jeweiligen Leistungsgeschichte der Proben, welches für die Probe GU1 mit einem Wert von 59,457 MW/tHM in der Mitte des Zyklus 12, für die Probe GU3' mit einem Wert von 67,707 MW/tHM in der Mitte des Zyklus 16 sowie für die Probe GU4 mit einem Wert von etwa 45,020 MW/tHM am Ende des Zyklus 16 auftritt.

Neben den Probenabbränden werden in /PRI 03/ auch brennelementgemittelte Abbrände aufgeführt, aus welchen sich entsprechend brennelementgemittelte Leistungen errechnet werden können. Bisher bezieht MOTIVE die vom Anwender angegebene Leistung grundsätzlich auf das gesamte Rechenmodell, was hier für die Verwendung

dieser brennelementgemittelten Leistungsverläufe sprechen würde. Dennoch wurde trotz der in MOTIVE fehlenden Möglichkeit, den für die Rechnung gegebenen Leistungsverlauf einem speziellen Stab zuzuordnen, die errechneten Probenleistungen für die Nachrechnungen genutzt. Zum einen erweist sich das Verhältnis der in /PRI 03/ gegebenen brennelementgemittelten Abbrände und jeweiligen Probenabbrände für die Probe GU1 innerhalb der einzelnen Zyklen als nahezu konstant und steigt von Zyklus 12 zu Zyklus 15 nur um lediglich 5 % an, so dass sich die jeweils abzuleitenden Leistungsverläufe nach Normierung auf die gemessene  $^{148}\text{Nd}$ -Konzentration nicht wesentlich unterscheiden. Zum anderen werden für die Proben GU3' und GU4 die brennelementgemittelten Abbrände nur für Zyklusbeginn und -ende aufgeführt, so dass sich daraus für diese Proben kein vergleichbarer zeitlich aufgelöster Verlauf der brennelementgemittelten Leistungen ableiten lässt. Folglich stehen für die Nachrechnungen dieser Proben nur die Probenleistungen zur Verfügung.

Bislang ist es in MOTIVE nur möglich, eine einheitliche Brennstofftemperatur für alle Brennstoffmaterialien anzugeben, wodurch in den Nachrechnungen allen Brennstäben dieselbe Brennstofftemperatur zugeordnet wurde. Es ist aber zu erwarten, dass die Brennstäbe entsprechend ihrer Leistung bei der Bestrahlung unterschiedliche Temperaturen aufwiesen. So wird durch dieses Vorgehen ein gewisser Fehler in die Nachrechnungen eingebracht. Die Maßgabe, die Abbrandrechnung möglichst mit den gegebenen Daten durchzuführen, lässt sich mit der derzeitigen MOTIVE-Version aber nur in dieser Weise erfüllen.

Zusätzlich zur Moderatortemperatur wurde der nominelle Moderatordruck von 153 bar zur Berechnung der Moderatordichte verwendet. Dementsprechend wurde die zusätzlich in /PRI 03/ angegebene Moderatordichte nicht weiter berücksichtigt, bzw. durch eine aktuelle Parametrisierung der Wasserzustandsgleichung neu berechnet (vgl. Kap. 2.4.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“).

Auf die Modellierung des Brennstabtauschs im Brennelement 12-40 (Probe GU1) in den Zyklen 14 und 15 wurde bei der hier vorliegenden Probennachrechnung verzichtet. Zwar liegen die ausgetauschten Brennstäbe in direkter Nachbarschaft zum Probenstab, in der Mehrzahl der Fälle weisen die neu eingebrachten Brennstäbe aber ähnliche Abbrände wie die ursprünglichen Brennstäbe auf, so dass anzunehmen ist, dass die neu eingebrachten Brennstäbe eine ähnliche Abbrandhistorie wie die ursprünglichen Stäbe unterlegen haben (vgl. Kap. 2.4.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Daher wird hier unterstellt, dass diese Stabswechsel keinen wesentlichen Einfluss auf

den Probenstab haben. Lediglich zwei Brennstäbe auf diagonalen Nachbarpositionen zum Probenstab wurden durch Stäbe ersetzt, die einen deutlich höheren Abbrand als die ursprünglichen Stäbe aufweisen. Für diese Stabwechsel kann ein gewisser Einfluss auf den Probenstab nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der fehlenden Informationen zur Herkunft der neu eingebrachten Stäbe, wodurch insbesondere deren Nuklidinventar unbekannt bzw. nicht belastbar zu bestimmen ist, wurde hier auf die Modellierung aller Stabwechsel für die Probe GU1 verzichtet.

Auch auf die Modellierung der weiteren Stabwechsel, welche beim Wechsel des Probenstabs der Proben GU3' und GU4 aus dem Brennelement 1601 in das Brennelement 1701 vorgenommen wurden, wurde an dieser Stelle verzichtet. Die drei weiteren ausgetauschten Brennstäbe dürften zwar deutlich höhere Abbrände aufweisen als die ursprünglich vorhandenen Stäbe, wurden aber in Positionen mit jeweils einer Reihe Abstand zum Probenstab eingesetzt. Damit kann zwar auch hier ein gewisser Einfluss auf den Probenstab nicht ausgeschlossen werden, dieser Einfluss sollte aber durch den zusätzlichen Abstand zum Probenstand reduziert werden. Aufgrund der fehlenden Informationen, welchen Stabpositionen im Brennelement 1601 diese weiteren Stäbe entnommen wurden, lässt sich aber auch in diesem Fall das Nuklidinventar dieser Stäbe nicht im Einzelnen bestimmen, weshalb zunächst auf die Modellierung dieser weiteren Stabwechsel für die Proben GU3' und GU4 verzichtet wurden.

Als Zerfallszeit nach Ende der Bestrahlung wird für jedes Nuklid dessen individueller Zeitraum zwischen Ende der Bestrahlung und Zeitpunkt der Messung berücksichtigt. Die im Einzelnen in der Nachrechnung herangezogenen Abklingzeiten sind in Tab. 2.68 zusammengestellt.

**Tab. 2.66** Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 12 bis 15 für das Brennelement 12-40 des Reaktors Gösgen nach /PRI 03/

Zyklus	Akkumulierte Zeit [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Mittl. Bor-konzentration [ppm]	Probe GU1		
				Moderator-temperatur [K]	Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum
12	0,1	0,1	1508,2	580,8	1151,3	98,924
	6,0	6,0	1342,2	580,8	1151,3	98,924
	150,0	150,0	872,0	581,3	1171,5	100,000
	294,9	294,9	286,5	581,2	1136,0	92,942
	317,0	317,0	8,0	581,5	1078,3	88,172
Revision	45,0	362,0				
13	0,1	362,1	1474,2	580,1	919,3	67,942
	6,0	368,0	1308,2	580,1	919,3	67,942
	150,0	512,0	843,5	580,5	967,7	75,563
	292,3	654,3	274,5	580,3	957,9	76,661
	321,3	683,3	7,0	580,7	943,1	74,896
Revision	26,7	710,0				
14	0,1	710,1	1514,2	581,4	888,9	52,995
	6,0	716,0	1344,7	581,4	888,9	52,995
	150,0	860,0	863,5	581,9	894,4	68,962
	290,1	1000,1	277,0	581,8	854,8	68,414
	331,3	1041,3	5,0	582,1	841,4	85,251
Revision	49,7	1091,0				
15	0,1	1091,1	1421,2	582,6	806,6	57,072
	6,0	1097,0	1245,7	582,6	806,6	57,072
	150,0	1241,0	924,0	583,0	829,8	60,978
	301,9	1392,9	305,0	582,8	810,6	57,281
	326,7	1417,7	5,0	583,1	804,0	53,521

**Tab. 2.67** Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 16 bis 18 für die Brennelemente 1601 und 1701 des Reaktors Gösgen nach /PRI 03/

Zyklus	Akkumulierte Zeit [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]		Borkonzentration [ppm]	Probe GU3'				Probe GU4			
		BE 1601	BE 1701		Moderator-temperatur [K]	Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum <sup>1</sup>		Moderator-temperatur [K]	Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum <sup>1</sup>	
							BE 1601	BE 1701			BE 1601	BE 1701
16	0,1	0,1		1702,0	581,9	1203,1	99,017		581,9	731,1	43,287	
	6,0	6,0		1523,0	581,9	1203,1	99,017		581,9	731,1	43,287	
	150,0	150,0		1018,5	581,9	1244,1	100,000		581,9	782,0	63,208	
	320,0	320,0		347,5	581,9	1194,6	92,138		581,9	901,1	89,863	
	336,8	336,8		5,0	581,9	1154,1	85,556		581,9	1008,5	100,000	
Revision	34,2	371,0										
17	0,1	371,1	0,1	1598,1	581,9	1052,5	79,853	90,602	581,9	744,8	48,357	54,866
	6,0	377,0	6,0	1421,1	581,9	1052,5	79,853	90,602	581,9	744,8	48,357	54,866
	150,0	521,0	150,0	924,5	581,9	1068,5	79,607	90,323	581,9	786,9	63,013	71,496
	299,5	670,5	299,5	305,5	581,9	1005,0	74,834	84,908	581,9	865,5	83,858	95,147
	328,7	699,7	328,7	9,0	581,6	978,7	70,933	80,482	581,6	949,8	92,471	104,920
Revision	32,3		361,0									
18	0,1		361,1	1671,9	581,9	944,7		69,533	581,9	687,0		37,437
	6,0		367,0	1484,4	581,9	944,7		69,533	581,9	687,0		37,437
	150,0		511,0	965,5	581,9	933,6		64,169	581,9	709,1		42,994
	301,2		662,2	324,0	581,9	866,6		58,334	581,9	756,8		58,712
	331,6		692,6	17,0	581,6	858,0		53,537	581,6	805,6		59,189

<sup>1</sup> Akkumulierte Zeit im Reaktor und Leistungsverläufe sind sowohl für das Brennelement (BE) 1601 also auch 1701 gegeben

**Tab. 2.68** Berücksichtigte individuelle Zerfallszeiten der errechneten Nuklidkonzentrationen der Proben des Reaktors Gösgen nach /PRI 03/

Es handelt sich dabei um die Proben GU1, GU3' und GU4 aus den Brennelementen 12-40 und 1601 bzw. 1701

Nuklid	Abklingzeit [d]			Nuklid	Abklingzeit [d]		
	GU1	GU3'	GU4		GU1	GU3'	GU4
<sup>234</sup> U	1040	857	712	<sup>147</sup> Sm	1054	919	846
<sup>235</sup> U	1040	857	712	<sup>148</sup> Sm	1054	919	846
<sup>236</sup> U	1040	857	712	<sup>149</sup> Sm	1054	919	846
<sup>238</sup> U	1040	857	712	<sup>150</sup> Sm	1054	919	846
<sup>237</sup> Np	1040	928	739	<sup>151</sup> Sm	1054	919	846
<sup>238</sup> Pu	1053	856	801	<sup>152</sup> Sm	1054	919	846
<sup>239</sup> Pu	1053	856	801	<sup>154</sup> Sm	1054	919	846
<sup>240</sup> Pu	1053	856	801	<sup>151</sup> Eu	1054	754	
<sup>241</sup> Pu	1053	856	801	<sup>153</sup> Eu	1054	754	849
<sup>242</sup> Pu	1053	856	801	<sup>154</sup> Eu	1054	754	849
<sup>244</sup> Pu	1053	–		<sup>155</sup> Eu	1054	754	849
<sup>241</sup> Am	1040	927	739	<sup>155</sup> Gd	1051	907	849
<sup>242(m)</sup> Am	1040	927		<sup>133</sup> Cs	1091	754	851
<sup>243</sup> Am	1040	927	739	<sup>134</sup> Cs	1091	754	851
<sup>242</sup> Cm	1096	754		<sup>135</sup> Cs	1091	754	851
<sup>243</sup> Cm	1096	754		<sup>137</sup> Cs	1091	754	851
<sup>244</sup> Cm	1096	754	739	<sup>90</sup> Sr	1116	1074	891
<sup>245</sup> Cm	1096	754	739	<sup>95</sup> Mo	2137	1038	891
<sup>246</sup> Cm	1096	754		<sup>99</sup> Tc	2137	1038	891
<sup>142</sup> Nd	1040	900	845	<sup>101</sup> Ru	2137	1038	891
<sup>143</sup> Nd	1040	900	845	<sup>106</sup> Ru	1000	754	891
<sup>144</sup> Nd	1040	900	845	<sup>103</sup> Rh	2137	1038	891
<sup>145</sup> Nd	1040	900	845	<sup>109</sup> Ag	2137	1038	
<sup>146</sup> Nd	1040	900	845	<sup>125</sup> Sb	1000	754	
<sup>148</sup> Nd	1040	900	845	<sup>129</sup> I	–	930	915
<sup>150</sup> Nd	1040	900	845	<sup>144</sup> Ce	1000	754	845
<sup>147</sup> Pm	1060	1000	846				

### 2.4.3 Resultate

Der Vergleich zwischen den experimentellen Daten und den Nachrechnungen für die drei ARIANE-Proben aus Gösgen ist in tabellarischer Form in Tab. 2.69 und in Form von Balkendiagrammen in Abb. 2.33 – Abb. 2.35 dargestellt. Einzelne Datenpunkte mit sehr großen Abweichungen sind zur besseren Übersicht in der graphischen Darstellung weggelassen. Insgesamt fällt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen rechnerischen und experimentellen Werten auf. Nur für wenige Nuklide ergeben sich Abweichungen größer als 10 %. Für die Proben GU1 und GU4 sind die Abweichungen für  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  sehr gering, wobei aufgrund der sehr kleinen angegebenen experimentellen Fehler nicht immer von einer Überstimmung im Rahmen der Messunsicherheiten gesprochen werden kann. Für GU3' sind die Abweichungen etwas größer, allerdings immer noch im Bereich aus anderen Nachrechnungen bekannter Werte. Auffällig sind die geringen Abweichungen für die höheren Aktinoiden. Insbesondere für die Curium-Nuklide liegen die Abweichungen häufig unter 10 % und damit signifikant geringer als bei anderen Experimenten. Die Qualität der Übereinstimmung bei den Spaltprodukten kann ebenfalls als gut bezeichnet werden. Bis auf einige Ausreißer ( $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ ) sind die C/E-1-Werte vergleichbar mit anderen experimentellen Serien oder sogar besser. Insbesondere sind die geringen Abweichungen bei einigen metallischen Spaltprodukten hervorzuheben. Für  $^{125}\text{Sb}$  ergeben sich auch für die Gösgen-Proben große Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment.

**Tab. 2.69** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %

Probe	GU1	GU3'	GU4	Probe	GU1	GU3'	GU4
<sup>234</sup> U	17,4	41,0	43,3	<sup>125</sup> Sb	60,1	67,1	-
<sup>235</sup> U	-1,2	-3,5	0,2	<sup>129</sup> I	-	-13,4	-21,3
<sup>236</sup> U	0,7	0,3	-0,1	<sup>133</sup> Cs	3,8	6,2	2,1
<sup>238</sup> U	0,0	0,1	0,0	<sup>134</sup> Cs	1,4	3,3	-3,2
<sup>237</sup> Np	-	-13,8	-30,2	<sup>135</sup> Cs	-4,2	-1,9	5,5
<sup>238</sup> Pu	5,6	-1,6	0,1	<sup>137</sup> Cs	-1,8	0,7	7,6
<sup>239</sup> Pu	-4,2	-7,4	-2,3	<sup>144</sup> Ce	0,4	15,6	7,3
<sup>240</sup> Pu	-4,5	-2,1	-3,3	<sup>142</sup> Nd	2,8	3,1	14,4
<sup>241</sup> Pu	-5,6	-4,9	-4,6	<sup>143</sup> Nd	1,6	0,5	-3,0
<sup>242</sup> Pu	-5,0	-0,8	-2,1	<sup>144</sup> Nd	-0,7	-1,5	-4,0
<sup>244</sup> Pu	-27,1	-45,1	-	<sup>145</sup> Nd	1,4	0,5	-1,1
<sup>241</sup> Am	-1,0	-7,9	-7,5	<sup>146</sup> Nd	0,0	-0,9	-1,7
<sup>242m1</sup> Am	-7,8	-17,1	-	<sup>148</sup> Nd	-0,3	-0,2	0,0
<sup>243</sup> Am	-3,8	1,7	1,1	<sup>150</sup> Nd	-2,0	-1,4	1,1
<sup>242</sup> Cm	-7,1	-4,8	-	<sup>147</sup> Pm	45,7	47,7	-3,1
<sup>243</sup> Cm	236,4	33,6	-	<sup>147</sup> Sm	-2,8	-2,7	9,2
<sup>244</sup> Cm	-4,0	-9,5	-17,0	<sup>148</sup> Sm	-3,7	-4,2	-3,2
<sup>245</sup> Cm	8,7	-3,9	-11,2	<sup>149</sup> Sm	-9,4	5,9	4,5
<sup>246</sup> Cm	-17,5	-15,1	-	<sup>150</sup> Sm	2,3	5,1	7,6
<sup>90</sup> Sr	-29,1	-4,1	-8,5	<sup>151</sup> Sm	-5,3	-3,6	2,3
<sup>95</sup> Mo	0,8	-11,6	-3,2	<sup>152</sup> Sm	-6,1	5,6	8,1
<sup>99</sup> Tc	2,9	-8,0	27,4	<sup>154</sup> Sm	-1,5	8,7	10,8
<sup>101</sup> Ru	4,9	-12,7	-2,8	<sup>151</sup> Eu	-60,0	-47,9	-
<sup>106</sup> Ru	7,7	-30,1	-15,4	<sup>153</sup> Eu	-4,3	-3,0	3,8
<sup>103</sup> Rh	16,8	21,5	-0,6	<sup>154</sup> Eu	10,7	4,6	12,8
<sup>109</sup> Ag	106,9	3,3	-	<sup>155</sup> Eu	-5,3	-8,2	-0,2
				<sup>155</sup> Gd	1,0	4,8	-30,4

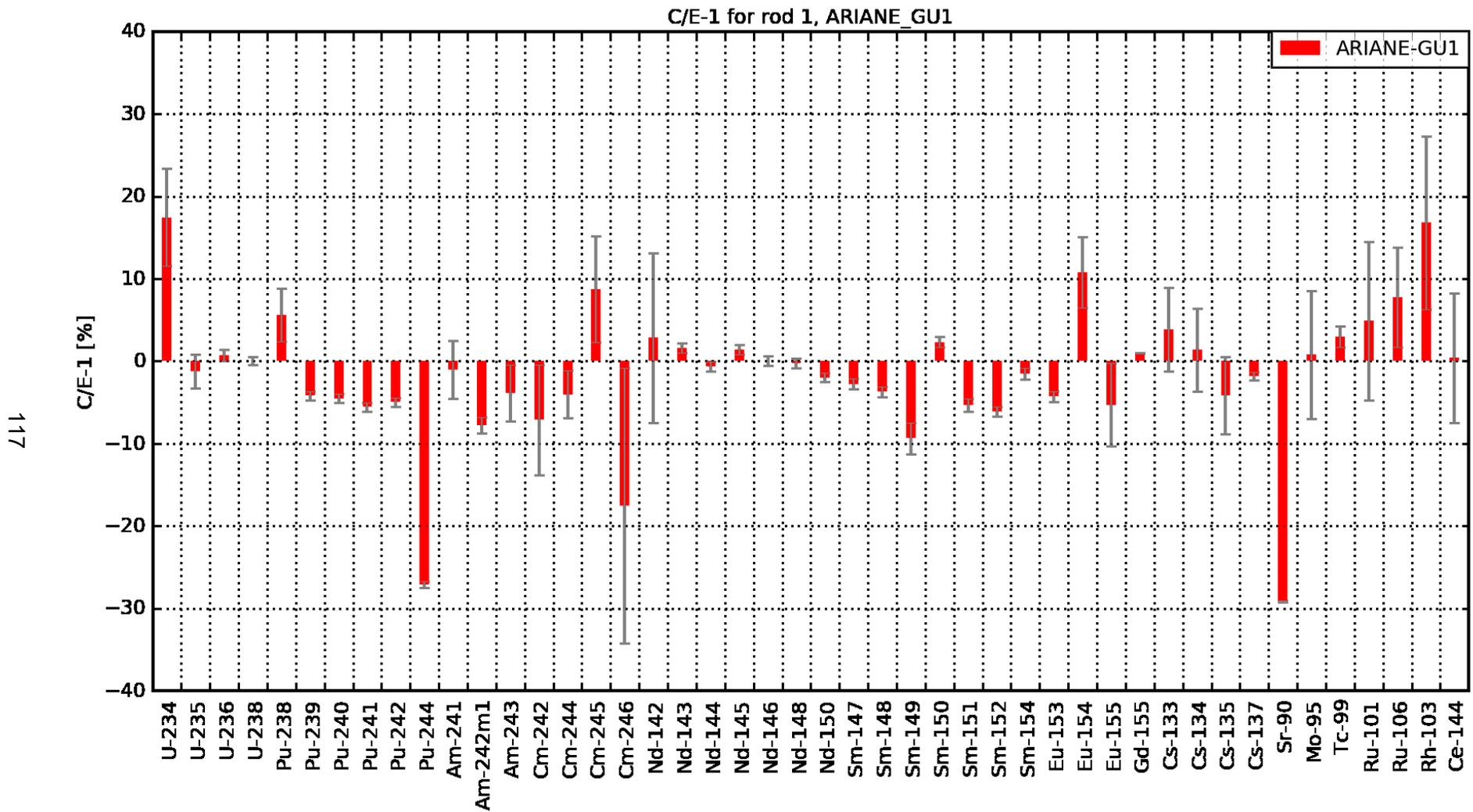


Abb. 2.33 ARIANE, GU1: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

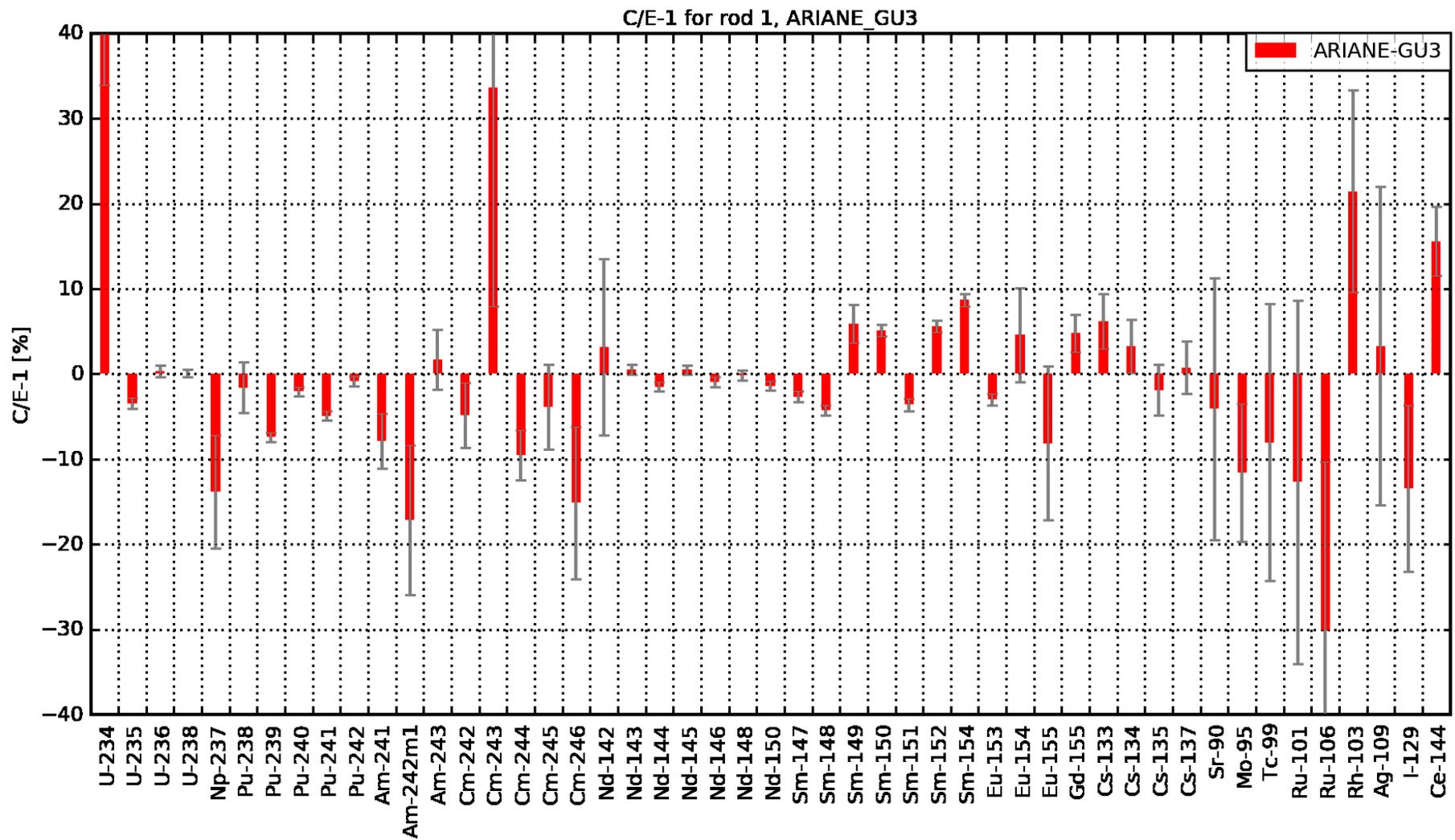


Abb. 2.34 ARIANE, GU3': Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

C/E-1 for rod 1, ARIANE\_GU4

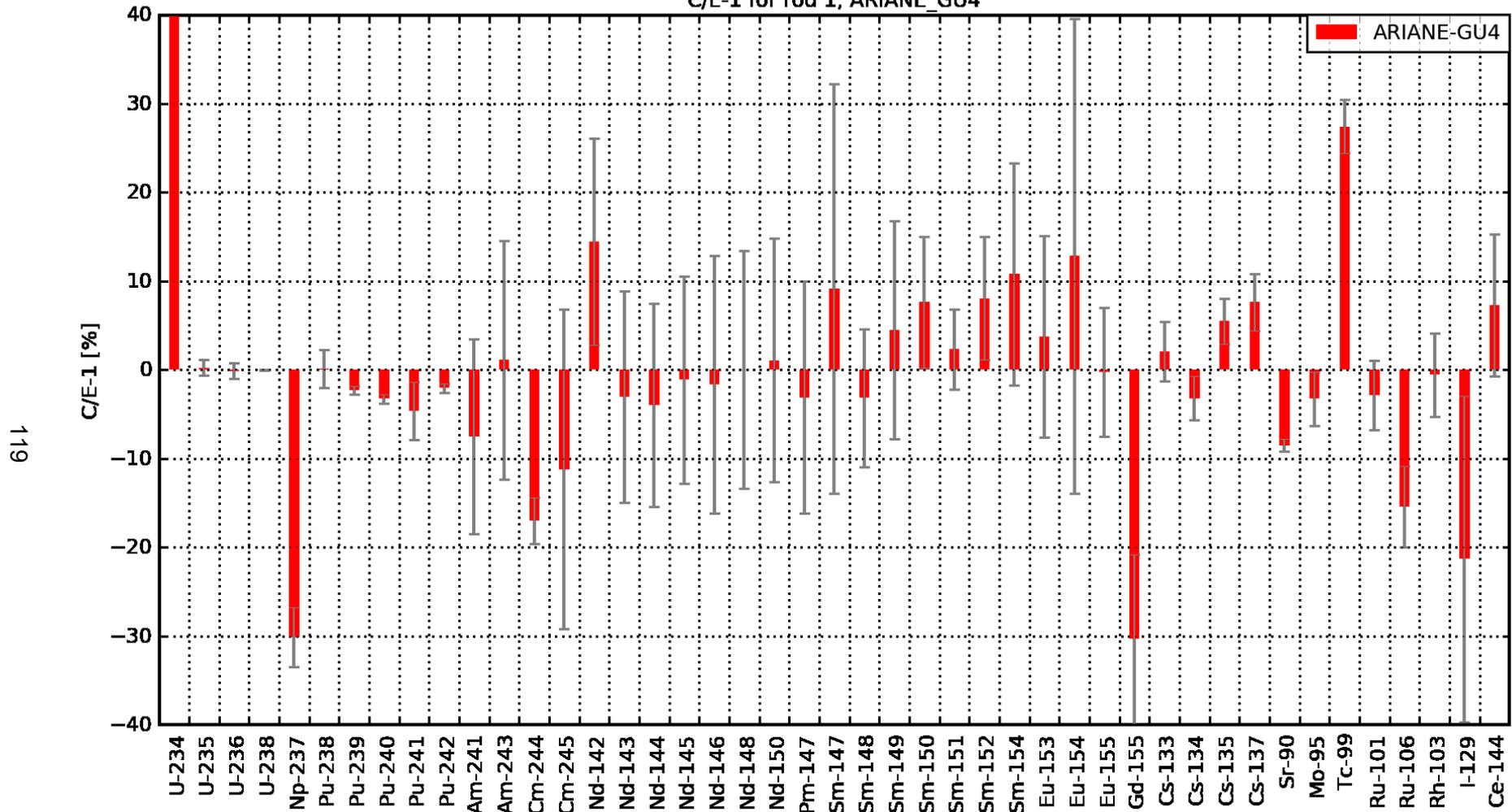
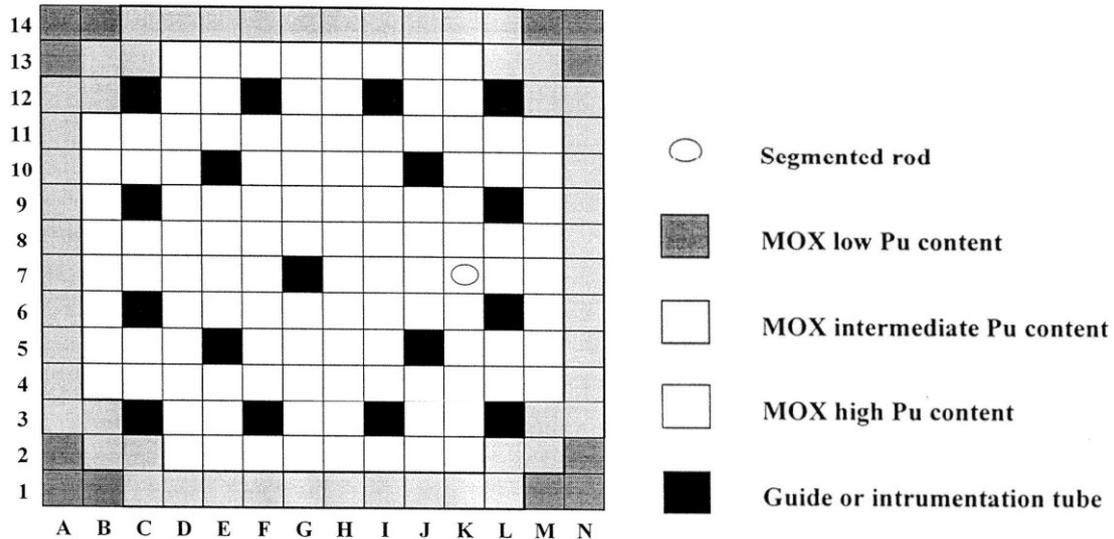


Abb. 2.35 ARIANE, GU4: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

## 2.5 Proben des Reaktors Beznau-I aus dem ARIANE-Programms

Im ARIANE-Programm sind Proben von Brennelementen aus den Reaktoren Beznau-I, Gösgen (Kap. 2.4) und Dodewaard radiochemisch analysiert worden. Im Fall des Reaktors Beznau-I stammen die analysierten Proben „BM1“, „BM2“, „BM3“ und „BM4“ aus dem MOX-Brennelement M109. Aufgrund von Problemen während des Programmablaufs und der radiochemischen Analysen wurde das experimentelle Programm nachträglich erweitert und zusätzliche Proben in das Programm aufgenommen. Im Fall des Reaktors Beznau-I waren dies die Proben „BM5“, „BM5“ und „BM6“ aus dem Brennelement M308 (Abb. 2.36). Eine Folge der aufgetretenen Probleme ist allerdings, dass daher nicht alle vermessenen radiochemischen Proben in gleicher Qualität vorliegen. Die Resultate einzelner Proben erwiesen sich im Nachhinein als nur bedingt oder nicht weiter verwendbar. Daher wurden für diesen Bericht nur eine Auswahl der insgesamt 15 analysierten Proben nachgerechnet.

Im Folgenden werden die Nachrechnungen der Proben BM5/BM5' und BM6 aus dem Reaktor Beznau beschrieben. Diese Proben stammen aus dem Brennstab K7 des Brennelements M308 (Abb. 2.36). Die Proben BM5 und BM5' können dabei aus Sicht der Nachrechnungen als praktisch identisch betrachtet werden, da sie einem geteilten ca. 7 cm langen Abschnitt des Brennstabs entstammen und somit praktisch identischen Bestrahlungsbedingungen ausgesetzt waren. Sie wurden aber unabhängig voneinander radiochemisch analysiert, so dass zwei unabhängige Sätze experimenteller Daten zum Vergleich mit den errechneten Werten zur Verfügung stehen. Gemessen vom unteren Ende des Brennstabs sind die Proben BM5 bzw. BM5' zwischen 84,1 cm und 91,3 cm und die Probe BM6 zwischen 14,5 cm und 18,3 cm entnommen worden, d. h. BM6 ist eine Probe relativ nahe vom unteren Ende des Brennstabs. Die weiteren im experimentellen Programm enthaltenen Proben BM1 bis BM4 wurden hier nicht betrachtet.



**Abb. 2.36** Schematische Darstellung des Brennelements M308 aus dem Beznau-I /PRI 03/

### 2.5.1 Experimentelle Daten

Die für Nachrechnung der radiochemischen Proben notwendigen Informationen, Daten und experimentellen Resultate des ARIANE-Programms sind im Bericht /PRI 03/ zusammengefasst. Dieser Bericht ist seinerseits eine Zusammenstellung einer Reihe von internen Vorträgen und Berichten des ARIANE-Programms, die neben den notwendigen Daten auch den Programmablauf und die aufgetretenen Probleme beschreiben.

#### Reaktordaten

Der Reaktor Beznau-I ist ein Druckwasserreaktor mit einer nominellen thermischen Leistung von 1130 MW. Die weiteren für die Probennachrechnungen relevanten Reaktordaten aus /PRI 03/ sind in Tab. 2.54 zusammengefasst. Zu beachten ist dabei, dass die Angabe des Moderator- bzw. Kühlmitteldrucks in /PRI 03/ in der Einheit  $\text{kg/cm}^2$  vorliegt. Hier ist zu vermuten, dass diese Angabe mit der Einheit „bar“ gleichzusetzen ist, vgl. Kap. 2.4.1, Abschnitt „Reaktordaten“.

**Tab. 2.70** Relevante Reaktordaten des Reaktors Beznau-I /PRI 03/

Parameter	
Nomineller Kühlmitteldruck <sup>1</sup> [kg/cm <sup>2</sup> ]	158,2
Kühlmitteleinlasstemperatur [°C]	283,8
Kühlmittelauslasstemperatur [°C]	316,9

<sup>1</sup> Der Werte wird in /PRI 03/ als Druck beschrieben, auch wenn die angegebene physikalische Einheit mit kg/cm<sup>2</sup> formal kein Druck ist.

### Brennelement

Das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I ist ein 14 × 14-DWR-Brennelement aus MOX-Brennstoff mit drei Gruppen von Brennstäben, die sich jeweils durch ihren Plutoniumanteil unterscheiden, sowie mit 16 Steuerstabführungsrohren und einem Instrumentierungsrohr (Abb. 2.36). Angaben zu den geometrischen Abmessungen des Brennelements und der Brennstäbe aus /PRI 03/ sind in Tab. 2.71 zusammengestellt. Zur exakten Lage des einen Instrumentierungsrohrs, welches sich in seinen geometrischen Abmessungen von den 16 Steuerstabführungsrohren unterscheidet, sind in /PRI 03/ keine Angaben enthalten. Es kann aber aufgrund der Brennelementsymmetrie unterstellt werden, dass das Instrumentierungsrohr im Zentrum des Brennelements positioniert ist.

**Tab. 2.71** Geometrische Abmessungen des Brennelements M308 und dessen Brennstäbe nach /PRI 03/

Parameter	
Pelletdurchmesser [cm]	0,929
Hüllrohrinnendurchmesser [cm]	0,948
Hüllrohraußendurchmesser [cm]	1,072
Aktive Brennstoffhöhe [cm]	302,3
Steuerstabführungsrohrinnendurchmesser [cm]	1,250
Steuerstabführungsrohraußendurchmesser [cm]	1,336
Instrumentierungsrohrinnendurchmesser [cm]	0,948
Instrumentierungsrohraußendurchmesser [cm]	1,072
Brennstabmittenabstand [cm]	1,412
Brennelementmittenabstand [cm]	19,82

## Materialzusammensetzung

Wie in Abb. 2.36 dargestellt, enthält das Brennelement M308 drei Gruppen von Brennstäben mit unterschiedlichem Plutoniumanteil. Hierzu sind in /PRI 03/ lediglich quantitative Angaben zum Plutoniumvektor und der Brennstoffdichte des Probenstabs aufgeführt, nicht jedoch zu den übrigen Stäben des Brennelements (s. u.). Zusätzlich zum Plutoniumvektor ist auch eine Angabe zu Verunreinigungen enthalten, allerdings nur in Form eines Bor-Äquivalents. Alle diese in /PRI 03/ enthaltenen Angaben sind in Tab. 2.72 und Tab. 2.73 zusammengefasst.

Die Umrechnung der verschiedenen Angaben zur Brennstoffdichte in Tab. 2.73 zeigt, dass aus der angegebenen Brennstoffdichte von  $10,3 \text{ g/cm}^3$  bei unterstellter idealer Zylindergeometrie eine lineare Massenbelegung von  $6,982 \text{ g/cm}$  bzw. umgekehrt aus der gegebenen Massenbelegung eine Dichte von  $10,244 \text{ g/cm}^3$  folgt. Eine mögliche Erklärung für diese vermeintliche Diskrepanz wäre die Annahme von Aussparungen an den Pelletstirnseiten („Dishing“) wie im Fall der Probe GU1 (Kap. 2.4.1); hierzu liegen in /PRI 03/ aber keine Angaben vor. Unterstellt man dennoch solche Aussparungen, wären sie für das Erzielen von Konsistenz zwischen angegebener Massenbelegung und Dichte in der Größe von  $3,7 \text{ mm}^3$  notwendig, was im Vergleich zu anderen Angaben (z. B. Tab. 2.86) ein kleines Volumen darstellt. Möglich wäre auch, dass an dieser Stelle im Bericht die Angaben Rundungseffekten unterliegen.

**Tab. 2.72** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Proben BM5/BM5' und BM6, gemessen März 1990, nach /PRI 03/

Isotop- bzw. Elementverhältnis	wt.-%
$(U + Pu + {}^{241}\text{Am}) / \text{MOX}$	88,164
$Pu / (Pu + U)$ <sup>1</sup>	5,5
${}^{234}\text{U} / U$	0,002
${}^{235}\text{U} / U$	0,231
${}^{236}\text{U} / U$	0,000
${}^{238}\text{U} / U$	99,767
${}^{238}\text{Pu} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$	0,603
${}^{239}\text{Pu} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$	66,086
${}^{240}\text{Pu} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$	23,198
${}^{241}\text{Pu} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$	6,554
${}^{242}\text{Pu} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$	2,643
${}^{241}\text{Am} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$ <sup>2</sup>	0,916
Bor-Äquivalent / $(U + Pu + {}^{241}\text{Am})$ [ppm]	1,153

<sup>1</sup> Die Klammerung ist so in /PRI 03/ nicht enthalten, es ist aber anzunehmen, dass die Angabe dort so gemeint ist.

<sup>2</sup> In /PRI 03/ ist an dieser Stelle  ${}^{241}\text{Pu} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$  angegeben, es ist aber zu vermuten, dass es sich hierbei um einen Tippfehler handelt und tatsächlich  ${}^{241}\text{Am} / (Pu + {}^{241}\text{Am})$  gemeint ist, wie hier angegeben.

**Tab. 2.73** Brennstoffdichteangaben für die Proben BM5/BM5' und BM6 nach /PRI 03/

Parameter	
Brennstoffdichte [%TD]	94,665
Brennstoffdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	10,3
Lineare Massenbelegung [g/cm]	6,944

Für die Plutoniumanteile im Brennstoff findet sich in /PRI 03/ lediglich die bereits in Tab. 2.72 enthaltene Angabe für den Probenstab von „Pu / (Pu + U) = 5,5 wt.-%“. Da der Probenstab zur Gruppe der „high Pu content“-Brennstäbe gehört, ist somit offensichtlich dieser Wert der Plutoniumanteil dieser Brennstabgruppe. Bezüglich des Plutoniumvektors ist zu erwarten, dass dieser zumindest innerhalb einer Brennstabgruppe-

weitgehend identisch ist<sup>9</sup>. Damit können folglich die Angaben für den Probenstab für die gesamte Gruppe der „high Pu content“-Brennstäbe übernommen werden.

Als weitere Informationsquellen für die Brennstoffzusammensetzungen können u. a. frühere Nachrechnungen dieser Proben dienen. So enthalten z. B. die Probennachrechnungen, /LEB 03/ und /MAC 04/ Werte für Brennstoffzusammensetzungen, welche allerdings nicht miteinander konsistent sind. Diskutiert wird dieser Aspekt auch in /KIL 08b/, wo der Schluss gezogen wird, dass die Plutoniumgehalte vermutlich 2,75 Gew.-%, 3,50 Gew.-% und 4,96 Gew.-% für „low Pu“, „intermediate Pu“ und „high Pu“ betragen. Diese Werte sind dabei entsprechend der Diskussion in /KIL 08b/ offensichtlich als Plutoniumanteil im Gesamtbrennstoff zu interpretieren, bei dem das Americium vermutlich mit zum Plutonium zu zählen ist. Daraus ergeben sich dann die in Tab. 2.74 zusammengestellten Verhältnisse, die sich für die „high Pu content“-Brennstäbe weitgehend mit der entsprechenden Angaben in /PRI 03/ decken.

Als Material für die Hüllrohre sowie für die Steuerstabführungs- bzw. Instrumentierungsrohre wird in /PRI 03/ einheitlich Zircaloy-4 („Zr-4“) angegeben. Daten zur Dichte oder Zusammensetzung sind dagegen nicht enthalten.

**Tab. 2.74** Wahrscheinliche Brennstoffzusammensetzung für das Brennelement M308 des Reaktors Beznau-I nach /KIL 08b/

	(Pu + <sup>241</sup> Am) / MOX [wt.-%]	Pu / (Pu + U) [wt.-%]	(Pu + <sup>241</sup> Am) / (U + Pu + <sup>241</sup> Am) [wt.-%]
low Pu	2,75	3,092	3,120
intermediate Pu	3,50	3,935	3,970
high Pu	4,96	5,578	5,627

### Bestrahlungsgeschichte

Das Brennelement M308 wurde von Juli 1990 bis Juni 1996 während der Zyklen 20 bis 25 im Reaktor Beznau-I bestrahlt (Tab. 2.75). Die Bestrahlungsschichte dieser Zyklen ist in /PRI 03/ vergleichsweise detailliert angegeben und enthält sowohl kern- und brennelementgemittelte Daten, Brennelement-gemittelte Daten auf Höhe der Proben wie

<sup>9</sup> Diese Annahme dadurch unterstützt, dass in /PRI 03/ für das Brennelement M109 für verschiedene Brennstäbe Plutoniumvektoren angegeben werden, die tatsächlich teils identisch sind, teils nur geringfügig voneinander abweichen.

auch probenspezifische Informationen, also Probenleistung und -abbrand sowie Moderator- und Brennstofftemperatur. Zusammengefasst sind die hier relevanten Informationen in Tab. 2.76 und Tab. 2.77.

Es ist zu beachten, dass in Tab. 2.76 bzw. Tab. 2.77 die Summe der angegebenen Zeitschrittlängen geringfügig von der Anzahl der Tage zwischen gegebenem Zyklusbeginn und -ende abweicht. Die Zeitschrittlängen sind also offensichtlich in Form von sog. „effective (full) power days“ zu interpretieren (Tab. 2.75).

**Tab. 2.75** Bestrahlungszeitraum des Brennelements M308 nach /PRI 03/

Zyklus	Zyklusbeginn	Zyklusende	Zyklusdauer Datum <sup>1</sup> [d]	Zyklusdauer Tab. 2.76 <sup>2</sup> [d]	Revision Datum <sup>3</sup> [d]
20	02.07.1990	09.05.1991	311	307,8	51
21	29.06.1991	02.07.1992	369	362,2	62
22	02.09.1992	01.04.1993	211	209,7	99
23	09.07.1993	17.06.1994	343	340,0	45
24	01.08.1994	30.06.1995	333	334,3	30
25	30.07.1995	28.06.1996	334	328,2	

<sup>1</sup> Zykluslänge entsprechend des Beginn- und Enddatums, die Tage von Zyklusbeginn und -ende werden jeweils zur Hälfte der Zyklusdauer und der Revision zugeordnet. Diese Werte sind nachträglich berechnet und so nicht in /PRI 03/ enthalten.

<sup>2</sup> Aus den Bestrahlungsdaten nach Tab. 2.76 bzw. Tab. 2.77 errechnete Zyklusdauer.

<sup>3</sup> Länge der Revisionen entsprechend des Zyklusende und -beginns.

Für die Proben sind sowohl Probenleistung als auch Probenabbrand angegeben. Abgesehen von Rundungseffekten, die allerdings für einzelne Zeitschritte bei der Umrechnung beide Werte ineinander zu Abweichungen von bis zu einigen Prozent führen, sind die jeweiligen Datensätze miteinander kompatibel. Dies bedeutet auch, dass die angegebenen Leistungswerte jeweils über den Zeitschritt gemittelte Werte sein müssen. Für die angegebenen Borkonzentrationen und lokalen Moderatortemperaturen wird in /PRI 03/ explizit angegeben, dass es sich jeweils um über den betreffenden Zeitschritt gemittelte Werte handelt. Dagegen fehlt eine entsprechende explizite Angabe für die Brennstofftemperaturen. Es ist aber zu vermuten, dass es sich auch dabei um dementsprechende Mittelwerte handelt.

Zusätzlich zur Probenleistung und -abbrand sind auch brennelementgemittelte Leistungen und Abbrandwerte für die axialen Abschnitte der Proben in /PRI 03/ gegeben (Tab. 2.76 bzw. Tab. 2.77). Der Vergleich dieser Brennelement-gemittelten Leistungen mit den jeweiligen Probenleistungen zeigt, dass sich beide Leistungen innerhalb eines

Zyklus nur um einen nahezu konstanten Faktor unterscheiden. Dieser Faktor variiert allerdings deutlich von Zyklus zu Zyklus. So beträgt z. B. für die Probe BM5/BM5' das Verhältnis von Brennelement-gemittelter Leistung zur Probenleistung für die Zyklen 20 bis 25 etwa 1,10, 0,97, 0,83, 0,98, 1,03 und 0,96. Ebenso zeigt die Probe BM6 ähnliche Werte. Diese deutliche Variation im Verhältnis der beiden Leistungen in den ersten drei Zyklen ist vermutlich eine Folge der Brennelementpositionierung im Reaktorkern. So befand sich das Brennelement M308 laut /PRI 03/ in den ersten drei Zyklen am Rand des Reaktorkerns und dürfte daher einen gewissen horizontalen Leistungsgradienten aufgewiesen haben, der dann unter Annahme einer entsprechenden Ausrichtung des Probenstabs zum Rand des Reaktorkerns zu der vorliegenden Variation in den genannten Leistungsverhältnissen geführt haben könnte.

Neben der Moderatortemperatur wird auch die Moderator-dichte je Zeitschritt angegeben. Der Vergleich der gegebenen Dichten mit den Werten der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) /INT 07/ unter Verwendung des angegebenen Kühlmitteldrucks von 158,2 bar und der gegebenen Moderatortemperaturen zeigt Abweichungen von bis zu 0,0015 g/cm<sup>3</sup>. Dabei ist die Tendenz zu beobachten, dass die in /PRI 03/ aufgelisteten Dichten im Mittel geringfügig unter den Werten der IAPWS liegen. Ein wesentlicher Teil dieser Abweichungen von bis zu 0,0010 g/cm<sup>3</sup> ist vermutlich durch Rundungseffekte bedingt, da die Moderatortemperaturen hier nur auf drei signifikante Stellen genau angegeben sind. Nähere Angaben zur Bestimmung der Dichten werden in /PRI 03/ nicht gemacht, vermutlich wurden sie aber aus den ermittelten Moderatortemperaturen abgeleitet und für diese Ableitung eine andere bzw. ältere Parametrisierung der Wasserzustandsgrößen als die hier berücksichtigte Parametrisierung der IAPWS verwendet.

**Tab. 2.76** Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 20 bis 25 des Reaktors Beznau-I für die Proben BM5/BM5' /PRI 03/

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Auf Höhe der Probe BM5 / BM5'						
			Mittlere Brennelementleistung [W/cm]	Mittlerer Brennelementabbbrand [GWd/tHM]	Probenstabilität [W/cm]	Probenstabbbrand [MWd/tHM]	Moderatortemperatur [°C]	Brennstofftemperatur Pelletzentrum [°C]	Brennstofftemperatur Pelletrand [°C]
20	1,0	1099	48,8	0,01	44	7	286	429	336
	1,5	944	101,5	0,03	92	30	288	525	379
	2,0	822	159,9	0,09	145	77	291	722	437
	1,0	712	224,6	0,12	203	110	294	848	490
	1,0	933	105,2	0,14	96	126	288	533	373
	110,0	560	218,1	4,06	198	3685	294	845	487
	0,5	492	157,9	4,07	144	3697	291	717	432
	76,0	286	215,8	6,76	197	6143	294	843	480
	0,5	415	97,3	6,76	89	6150	288	519	369
	23,0	147	209,3	7,55	191	6869	294	830	473
	0,2	356	97,1	7,56	89	6872	288	519	369
	3,5	111	209,0	7,67	191	6981	294	830	472
	0,5	225	150,7	7,69	138	6993	291	691	413
	69,5	24	210,8	10,08	193	9184	295	832	468
	17,6	90	201,7	10,66	186	9719	294	811	457
Revision	54,2								
21	0,5	1400	36,6	10,67	38	9722	285	399	327
	2,0	1244	75,4	10,69	78	9748	287	506	365
	1,5	1114	120,3	10,72	125	9778	289	628	383
	1,0	1044	150,1	10,75	156	9804	290	741	435
	1,0	1020	160,7	10,77	167	9831	290	758	442
	2,5	1015	161,0	10,84	167	9899	291	758	442
	0,5	1111	117,7	10,85	122	9909	289	616	370
	12,0	986	162,1	11,17	168	10239	291	760	441
	0,5	1072	117,3	11,18	122	10249	289	615	379
	51,5	889	161,8	12,54	168	11665	291	762	434
	1,0	915	115,7	12,56	121	11685	289	609	375
	138,0	617	159,6	16,16	167	15448	291	766	413
	0,2	506	119,7	16,16	126	15452	289	627	377
	83,0	306	157,8	18,30	166	17699	291	768	400
	1,0	435	72,4	18,32	76	17712	287	499	359
66,0	102	159,3	20,04	167	19515	291	770	395	
Revision	68,8	0							

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Auf Höhe der Probe BM5 / BM5'						
			Mittlere Brennelementleistung [W/cm]	Mittlerer Brennelementabbrand [GWd/tHM]	Probenstabilität [W/cm]	Probenstababbrand [MWd/tHM]	Moderatortemperatur [°C]	Brennstofftemperatur Pelletzentrum [°C]	Brennstofftemperatur Pellettrand [°C]
22	0,5	1071	35,3	20,04	42	19519	285	430	334
	2,0	916	72,6	20,06	87	19547	288	524	360
	2,0	784	117,2	20,10	140	19593	290	689	390
	2,0	711	147,7	20,15	176	19650	292	783	404
	35,0	622	162,2	21,08	193	20756	293	826	421
	38,0	508	161,2	22,08	191	21945	293	824	414
	1,0	677	73,9	22,09	88	21960	288	531	357
	129,2	258	155,2	25,37	183	25834	293	814	389
Revision	100,3	0							
23	8,0	1211	120,8	25,53	118	25988	289	597	357
	68,9	850	248,3	28,32	245	28747	295	906	405
	2,5	947	126,1	28,38	125	28798	289	630	364
	4,0	718	243,8	28,54	241	28956	295	920	393
	5,0	702	248,3	28,74	246	29157	296	905	406
	2,0	914	125,3	28,78	124	29196	289	627	363
	59,9	594	240,8	31,14	239	31537	296	930	383
	59,9	402	240,3	33,49	240	33886	296	929	387
	59,9	224	234,2	35,79	234	36179	296	961	376
	49,9	66	228,8	37,66	229	38051	296	1004	364
	20,0	50	185,7	38,26	186	38658	293	886	344
Revision	48,0	0							
24	6,0	1203	93,8	38,35	91	38747	288	563	321
	2,0	1063	148,5	38,40	145	38794	290	746	340
	1,0	1044	158,3	38,43	154	38819	291	757	342
	86,7	784	214,8	41,47	210	41793	294	940	354
	86,6	495	215,5	44,52	211	44779	295	911	363
	86,7	229	211,5	47,52	207	47713	295	892	364
	1,0	366	91,9	47,54	90	47728	288	565	332
	44,8	38	201,8	49,02	197	49175	294	880	358
	1,1	3	207,8	49,05	203	49211	295	886	362
	16,8	3	196,6	49,59	192	49740	294	875	356
	1,6	3	87,2	49,62	85	49762	288	559	335
Revision	28,7	0							

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Auf Höhe der Probe BM5 / BM5'						
			Mittlere Brennelementleistung [W/cm]	Mittlerer Brennelementabbrand [GWd/tHM]	Probenstabilität [W/cm]	Probenstabilität [MWd/tHM]	Moderatortemperatur [°C]	Brennstofftemperatur Pelletzentrum [°C]	Brennstofftemperatur Pellettrand [°C]
25	7,8	1160	74,4	49,71	77	49861	287	541	334
	60,6	827	158,5	51,28	165	51491	292	799	359
	1,0	951	78,0	51,29	81	51504	288	553	336
	57,6	627	164,0	52,84	170	53110	293	815	360
	57,6	442	172,0	54,46	179	54796	294	840	361
	1,0	462	126,6	54,48	132	54817	291	700	356
	53,7	272	169,7	55,97	176	56367	294	828	362
	1,0	434	80,9	55,98	84	56380	288	570	339
	65,4	102	168,8	57,79	175	58257	294	821	363
	1,0	8	174,9	57,82	182	58286	294	845	363
	20,5	30	159,6	58,35	166	58842	293	794	360
	1,0	246	68,1	58,36	71	58854	287	542	340

**Tab. 2.77** Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 20 bis 25 des Reaktors Beznau-I für die Probe BM6 /PRI 03/

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Auf Höhe der Probe BM6						
			Mittlere Brennelementleistung [W/cm]	Mittlerer Brennelementabbrand [GWd/tHM]	Leistung [W/cm]	Abbrand [MWd/tHM]	Moderatortemperatur [°C]	Brennstofftemperatur Pelletzentrum [°C]	Brennstofftemperatur Pellettrand [°C]
20	1,0	1099	23,3	0,00	21	3	284	350	311
	1,5	944	50,8	0,02	46	15	284	434	337
	2,0	822	84,8	0,04	77	40	285	500	363
	1,0	712	125,8	0,06	114	59	285	588	377
	1,0	933	54,3	0,07	49	67	284	443	340
	110,0	560	128,8	2,39	117	2169	285	598	379
	0,5	492	98,5	2,40	90	2177	285	518	373
	76,0	286	143,3	4,18	130	3797	286	654	397
	0,5	415	60,6	4,18	56	3802	284	458	347
	23,0	147	141,8	4,72	129	4287	286	649	394
	0,2	356	61,3	4,72	56	4289	284	458	347
	3,5	111	143,0	4,80	130	4364	286	654	396
	0,5	225	100,2	4,81	92	4371	285	520	367
	69,5	24	148,5	6,50	135	5910	286	674	404
	17,6	90	142,1	6,91	130	6285	285	651	393

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Auf Höhe der Probe BM6						
			Mittlere Brenn- elementleistung [W/cm]	Mittlerer Brenn- elementabbrand [GWd/tHM]	Leistung [W/cm]	Abbrand [MWd/tHM]	Moderator- temperatur [°C]	Brennstoff- temperatur Pelletzentrum [°C]	Brennstoff- temperatur Pellettrand [°C]
Revision	54,2								
21	0,5	1400	17,1	6,91	18	6287	284	338	304
	2,0	1244	36,7	6,92	38	6299	284	403	328
	1,5	1114	61,9	6,93	64	6314	285	465	351
	1,0	1044	80,1	6,95	82	6328	285	509	364
	1,0	1020	87,1	6,96	89	6343	285	516	365
	2,5	1015	87,5	7,00	90	6379	285	517	365
	0,5	1111	61,8	7,00	63	6384	285	464	350
	12,0	986	88,5	7,18	91	6563	285	518	365
	0,5	1072	62,4	7,18	64	6568	285	465	350
	51,5	889	91,4	7,95	94	7359	285	523	365
	1,0	915	65,5	7,96	57	7370	285	470	352
	138,0	617	98,7	10,19	102	9668	285	543	363
	0,2	506	77,4	10,19	80	9670	285	512	365
	83,0	306	107,5	11,65	111	11178	285	571	363
	1,0	435	46,2	11,66	48	11186	284	443	341
	66,0	102	111,1	12,86	115	12426	285	583	364
Revision	68,8	0							
22	0,5	1071	18,2	12,86	22	12427	284	353	311
	2,0	916	38,9	12,87	47	12443	284	440	340
	2,0	784	66,3	12,89	80	12469	285	512	365
	2,0	711	87,0	12,92	105	12503	285	555	359
	35,0	622	98,6	13,49	118	13181	285	594	366
	38,0	508	101,2	14,12	121	13934	285	604	368
	1,0	677	43,2	14,12	52	13943	284	453	345
	129,2	258	101,2	16,26	121	16487	285	602	364
Revision	100,3	0							

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Auf Höhe der Probe BM6						
			Mittlere Brenn- elementleistung [W/cm]	Mittlerer Brenn- elementabbrand [GWd/tHM]	Leistung [W/cm]	Abbrand [MWd/tHM]	Moderator- temperatur [°C]	Brennstoff- temperatur Pelletzentrum [°C]	Brennstoff- temperatur Pellettrand [°C]
23	8,0	1211	64,1	16,34	65	16582	284	468	350
	68,9	850	147,1	18,00	149	18256	286	718	397
	2,5	947	73,9	18,03	75	18287	284	494	355
	4,0	718	153,5	18,13	155	18388	286	737	400
	5,0	702	159,5	18,26	162	18520	286	755	397
	2,0	914	74,1	18,29	75	18544	284	495	355
	59,9	594	156,1	19,82	158	20095	286	746	395
	59,9	402	166,4	21,45	169	21753	286	767	384
	59,9	224	167,6	23,09	171	23426	286	772	381
	49,9	66	168,0	24,46	171	24825	286	771	372
	20,0	50	133,9	24,90	137	25271	285	675	372
Revision	48,0	0							
24	6,0	1203	49,5	24,95	48	25318	284	450	336
	2,0	1063	81,4	24,97	78	25343	285	510	350
	1,0	1044	88,4	24,99	85	25357	285	526	351
	86,7	784	130,8	26,84	126	27147	285	627	361
	86,6	495	146,4	28,92	142	29158	286	702	368
	86,7	229	153,9	31,10	150	31277	286	735	362
	1,0	366	62,0	31,11	60	31287	284	482	339
	44,8	38	149,3	32,20	145	32352	286	721	359
	1,1	3	159,6	32,23	155	32380	286	750	360
	16,8	3	150,5	32,64	146	32783	286	725	358
	1,6	3	61,7	32,66	60	32798	284	484	338
Revision	28,7	0							
25	7,8	1160	44,9	32,72	47	32858	284	451	331
	60,6	827	103,9	33,75	108	33932	285	582	347
	1,0	951	51,1	33,75	53	33940	284	468	334
	57,6	627	115,7	34,84	121	35077	285	624	355
	57,6	442	129,8	36,07	135	36352	286	692	355
	1,0	462	94,2	36,08	98	36368	285	565	331
	53,7	272	132,0	37,24	138	37577	286	709	350
	1,0	434	59,4	37,25	62	37587	284	495	333
	65,4	102	133,6	38,68	139	39076	286	718	347
	1,0	8	144,6	38,71	150	39100	286	748	329
	20,5	30	131,0	39,15	136	39557	286	704	350
1,0	246	51,5	39,15	54	39566	284	476	332	

## Experimentelle Messergebnisse

Die Messungen der Nuklidkonzentrationen im bestrahlten Brennstoff und die dabei erzielten Resultate sind in /PRI 03/ in verschiedener Form zusammengefasst. Experimentell untersucht wurden insgesamt 20 Nuklide der Aktinoiden Uran, Plutonium, Americium, Neptunium und Curium, zudem insgesamt zwölf Nuklide der Abbrandindikatoren Neodym, Cäsium und Cer sowie 22 bzw. 27 Nuklide der stark neutronenabsorbierenden Spaltprodukte. Für die Proben BM5 und BM6 wurden die entsprechenden Messungen am Paul-Scherrer-Institut (PSI) und für die Probe BM5' am SCK•CEN durchgeführt. Neben den chemischen Verfahren zur Auflösung des Brennstoffs und der Trennung der verschiedenen Elemente erfolgten die Messungen der Nuklidkonzentrationen am PSI hauptsächlich mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS), zumeist mit vorgeschalteter Hochdruckflüssigchromatographie zur Trennung der Elemente, sowie mittels  $\gamma$ -Spektrometrie. Dagegen wurde am SCK•CEN für die Mehrzahl der vermessenen Nuklidkonzentrationen Thermische Ionisations-Massenspektrometrie (TIMS) verwendet, in einzelnen Fällen kamen aber auch  $\alpha$ -,  $\beta$ - bzw.  $\gamma$ -Spektrometrie sowie ICP-MS zum Einsatz. Im Detail sind die verwendeten Messmethoden in Tab. 2.78 nuklidweise aufgeschlüsselt.

Letztlich gemessen wurden die Nuklidkonzentrationen in Form der jeweiligen Massenanteile der einzelnen Nuklide im bestrahlten Brennstoff, woraus zusätzlich die Massenverhältnisse der einzelnen Nuklide zum Uran im bestrahlten Brennstoff errechnet wurden. Neben dem Messzeitpunkt wurden zudem auch die Massenverhältnisse auf das Bestrahlungsende des Brennelements zurückgerechnet und angegeben /PRI 03/. Zusätzlich sind für die Massenanteile der jeweiligen Nuklide im bestrahlten Brennstoff absolute bzw. relative Unsicherheiten abgeschätzt worden, die als 95%-Konfidenzintervall angegeben sind. Zusammengefasst sind diese Resultate in Tab. 2.79 und Tab. 2.80 zusammen mit dem jeweiligen Datum der Messung.

Die ARIANE-interne Konsistenzprüfung der Messungen der Proben BM5 am PSI und BM5' am SCK•CEN zeigte allerdings für verschiedene Nuklide deutliche Inkonsistenzen in den Resultaten auf. Hiervon waren insbesondere  $^{235}\text{U}$ , die Plutonium- und Samarium-Isotope sowie einige weitere Spaltprodukte betroffen. Im Fall von  $^{235}\text{U}$ , der Plutonium-Isotope und  $^{129}\text{I}$  führten weitere Untersuchungen dazu, dass die betreffenden Messungen des PSI an der Probe BM5 als fehlerhaft verworfen wurden. Diese Messwerte sind in Tab. 2.79 in Rot angegeben.

**Tab. 2.78** Nuklidweise Zusammenstellung der verwendeten Messmethoden für die Proben BM5/BM5' und BM6 /PRI 03/

Nuklid	Messmethode		
	BM5 (PSI)	BM5' (SCK•CEN)	BM6 (PSI)
<sup>232</sup> U	— <sup>2</sup>	ICP-MS <sup>1</sup>	— <sup>2</sup>
<sup>234</sup> U	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>235</sup> U	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>236</sup> U	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>238</sup> U	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>237</sup> Np	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>238</sup> Pu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>239</sup> Pu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>240</sup> Pu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>241</sup> Pu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>242</sup> Pu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>244</sup> Pu	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>	TIMS	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>241</sup> Am	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>242(m)</sup> Am	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>243</sup> Am	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>242</sup> Cm	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>	α-Spec	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>243</sup> Cm	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>	γ-Spec	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>244</sup> Cm	HPLC-ICP-MS	α-Spec	HPLC-ICP-MS
<sup>245</sup> Cm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>246</sup> Cm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>142</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>143</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>144</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>145</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>146</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>148</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>150</sup> Nd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>147</sup> Pm	HPLC-ICP-MS	β-Spec	HPLC-ICP-MS
<sup>147</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>148</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>149</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>150</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS

Nuklid	Messmethode		
	BM5 (PSI)	BM5' (SCK-CEN)	BM6 (PSI)
<sup>151</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>152</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>154</sup> Sm	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>151</sup> Eu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>153</sup> Eu	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>154</sup> Eu	HPLC-ICP-MS	γ-Spec	HPLC-ICP-MS
<sup>155</sup> Eu	HPLC-ICP-MS	γ-Spec	HPLC-ICP-MS
<sup>154</sup> Gd	HPLC-ICP-MS	– <sup>2</sup>	HPLC-ICP-MS
<sup>155</sup> Gd	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>156</sup> Gd	HPLC-ICP-MS	– <sup>2</sup>	HPLC-ICP-MS
<sup>157</sup> Gd	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>	– <sup>2</sup>	HPLC-ICP-MS <sup>1</sup>
<sup>158</sup> Gd	HPLC-ICP-MS	– <sup>2</sup>	HPLC-ICP-MS
<sup>160</sup> Gd	HPLC-ICP-MS	– <sup>2</sup>	HPLC-ICP-MS
<sup>133</sup> Cs	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>134</sup> Cs	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>135</sup> Cs	HPLC-ICP-MS	TIMS	HPLC-ICP-MS
<sup>137</sup> Cs	HPLC-ICP-MS	γ-Spec	HPLC-ICP-MS
<sup>90</sup> Sr	HPLC-ICP-MS	β-Spec	HPLC-ICP-MS
<sup>95</sup> Mo	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>99</sup> Tc	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>101</sup> Ru	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>106</sup> Ru	γ-Spec	γ-Spec	γ-Spec
<sup>103</sup> Rh	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>109</sup> Ag	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<sup>125</sup> Sb	γ-Spec	γ-Spec	γ-Spec
<sup>129</sup> I	γ-Spec	ICP-MS	γ-Spec
<sup>144</sup> Ce	γ-Spec	γ-Spec	γ-Spec

<sup>1</sup> Kein Resultat, da Nuklidkonzentration unterhalb der Nachweisschwelle.

<sup>2</sup> Nicht gemessen.

**Tab. 2.79** Gemessene Massenverhältnisse im bestrahlten Brennstoff für die Proben BM5 (PSI) und BM5' (SCK•CEN) /PRI 03/

Die Angaben beziehen sich auf die Gesamtmasse des bestrahlten Brennstoffs bzw. den Massenanteil von <sup>238</sup>U im bestrahlten Brennstoff.

Nuklid	Probe BM5			Probe BM5'		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>234</sup> U	20.04.1999	0,0448 ± 0,0111 <sub>2σ</sub>	0,0561	12.10.1999	0,0497 ± 0,0050 <sub>2σ</sub>	0,0622
<sup>235</sup> U	20.04.1999	0,739 ± 0,131 <sub>2σ</sub>	0,925	12.10.1999	0,586 ± 0,012 <sub>2σ</sub>	0,734
<sup>236</sup> U	20.04.1999	0,268 ± 0,027 <sub>2σ</sub>	0,336	12.10.1999	0,269 ± 0,014 <sub>2σ</sub>	0,337
<sup>238</sup> U	20.04.1999	798 ± 33 <sub>2σ</sub>	999	12.10.1999	798 ± 36 <sub>2σ</sub>	999
<sup>237</sup> Np	15.09.1999	0,175 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,219	22.12.1999	0,184 ± 0,020 <sub>2σ</sub>	0,230
<sup>238</sup> Pu	04.05.1999	0,865 ± 0,103 <sub>2σ</sub>	1,08	11.10.1999	0,995 ± 0,030 <sub>2σ</sub>	1,25
<sup>239</sup> Pu	04.05.1999	9,25 ± 0,08 <sub>2σ</sub>	11,6	11.10.1999	9,80 ± 0,06 <sub>2σ</sub>	12,3
<sup>240</sup> Pu	04.05.1999	9,59 ± 0,09 <sub>2σ</sub>	12,0	11.10.1999	10,1 ± 0,1 <sub>2σ</sub>	12,6
<sup>241</sup> Pu	04.05.1999	4,47 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	5,59	11.10.1999	4,60 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	5,76
<sup>242</sup> Pu	04.05.1999	3,52 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	4,40	11.10.1999	3,67 ± 0,02 <sub>2σ</sub>	4,59
<sup>244</sup> Pu	–	–	–	11.10.1999	0,00100 ± 0,00050 <sub>2σ</sub>	0,00125
<sup>241</sup> Am	26.11.1999	1,08 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,35	20.12.1999	1,13 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	1,42
<sup>242(m)</sup> Am	26.11.1999	0,0104 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>	0,0131	20.12.1999	0,0106 ± 0,0011 <sub>2σ</sub>	0,0133
<sup>243</sup> Am	26.11.1999	0,864 ± 0,042 <sub>2σ</sub>	1,08	20.12.1999	0,937 ± 0,033 <sub>2σ</sub>	1,17
<sup>242</sup> Cm	–	–	–	01.07.1999	0,00149 ± 0,00005 <sub>2σ</sub>	0,00186
<sup>243</sup> Cm	–	–	–	01.07.1999	0,00690 ± 0,00073 <sub>2σ</sub>	0,00965
<sup>244</sup> Cm	26.11.1999	0,749 ± 0,031 <sub>2σ</sub>	0,937	01.07.1999	0,707 ± 0,022 <sub>2σ</sub>	0,885
<sup>245</sup> Cm	26.11.1999	0,0913 ± 0,0042 <sub>2σ</sub>	0,114	01.07.1999	0,0876 ± 0,0045 <sub>2σ</sub>	0,110

Nuklid	Probe BM5			Probe BM5'		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>246</sup> Cm	26.11.1999	0,0149 ± 0,0007 <sub>2σ</sub>	0,0187	01.07.1999	0,0140 ± 0,0015 <sub>2σ</sub>	0,0175
<sup>142</sup> Nd	31.05.1999	0,0285 ± 0,0028 <sub>2σ</sub>	0,0356	23.11.1999	0,0297 ± 0,0030 <sub>2σ</sub>	0,0372
<sup>143</sup> Nd	31.05.1999	0,960 ± 0,064 <sub>2σ</sub>	1,20	23.11.1999	1,04 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	1,30
<sup>144</sup> Nd	31.05.1999	1,46 ± 0,10 <sub>2σ</sub>	1,82	23.11.1999	1,55 ± 0,01 <sub>2σ</sub>	1,94
<sup>145</sup> Nd	31.05.1999	0,808 ± 0,056 <sub>2σ</sub>	1,01	23.11.1999	0,841 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,05
<sup>146</sup> Nd	31.05.1999	0,941 ± 0,064 <sub>2σ</sub>	1,18	23.11.1999	0,958 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	1,20
<sup>148</sup> Nd	31.05.1999	0,543 ± 0,036 <sub>2σ</sub>	0,680	23.11.1999	0,549 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,688
<sup>150</sup> Nd	31.05.1999	0,320 ± 0,022 <sub>2σ</sub>	0,400	23.11.1999	0,328 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,411
<sup>147</sup> Pm	23.12.1999	0,0667 ± 0,0092 <sub>2σ</sub>	0,0834	03.03.2000	0,0732 ± 0,0117 <sub>2σ</sub>	0,0917
<sup>147</sup> Sm	09.08.1999	0,245 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	0,307	13.12.1999	0,234 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,293
<sup>148</sup> Sm	09.08.1999	0,290 ± 0,004 <sub>2σ</sub>	0,364	13.12.1999	0,271 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,340
<sup>149</sup> Sm	09.08.1999	0,00515 ± 0,00053 <sub>2σ</sub>	0,00645	13.12.1999	0,00408 ± 0,00009 <sub>2σ</sub>	0,00511
<sup>150</sup> Sm	09.08.1999	0,471 ± 0,008 <sub>2σ</sub>	0,589	13.12.1999	0,433 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,542
<sup>151</sup> Sm	09.08.1999	0,0244 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>	0,0306	13.12.1999	0,0219 ± 0,0002 <sub>2σ</sub>	0,0274
<sup>152</sup> Sm	09.08.1999	0,176 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,221	13.12.1999	0,158 ± 0,001 <sub>2σ</sub>	0,198
<sup>154</sup> Sm	09.08.1999	0,106 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,133	13.12.1999	0,0887 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>	0,111
<sup>151</sup> Eu	09.08.1999	7,55E-04 ± 3,61E-04 <sub>2σ</sub>	9,45E-04	01.07.1999	7,76E-04 ± 0,16E-04 <sub>2σ</sub>	9,72E-04
<sup>153</sup> Eu	09.08.1999	0,232 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	0,290	01.07.1999	0,233 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,291
<sup>154</sup> Eu	09.08.1999	0,0529 ± 0,0013 <sub>2σ</sub>	0,0662	01.07.1999	0,0506 ± 0,0015 <sub>2σ</sub>	0,0633
<sup>155</sup> Eu	09.08.1999	0,0122 ± 0,0005 <sub>2σ</sub>	0,0152	01.07.1999	0,0135 ± 0,0012 <sub>2σ</sub>	0,0169
<sup>154</sup> Gd	09.08.1999	0,0276 ± 0,0010 <sub>2σ</sub>	0,0345	–	–	–

Nuklid	Probe BM5			Probe BM5'		
	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
<sup>155</sup> Gd	09.08.1999	0,00817 ± 0,00056 <sub>2σ</sub>	0,0102	02.12.1999	0,00734 ± 0,00015 <sub>2σ</sub>	0,00919
<sup>156</sup> Gd	09.08.1999	0,260 ± 0,008 <sub>2σ</sub>	0,325	–	–	–
<sup>158</sup> Gd	09.08.1999	0,0575 ± 0,0021 <sub>2σ</sub>	0,0720	–	–	–
<sup>160</sup> Gd	09.08.1999	0,00431 ± 0,00021 <sub>2σ</sub>	0,00540	–	–	–
<sup>133</sup> Cs	02.09.1999	1,58 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,98	01.07.1999	1,52 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,91
<sup>134</sup> Cs	02.09.1999	0,0726 ± 0,0025 <sub>2σ</sub>	0,0908	01.07.1999	0,0740 ± 0,0023 <sub>2σ</sub>	0,0927
<sup>135</sup> Cs	02.09.1999	1,07 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	1,34	01.07.1999	1,04 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	1,30
<sup>137</sup> Cs	02.09.1999	1,73 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	2,17	01.07.1999	1,67 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	2,09
<sup>90</sup> Sr	06.10.1999	0,402 ± 0,045 <sub>2σ</sub>	0,503	16.05.2000	0,314 ± 0,050 <sub>2σ</sub>	0,393
<sup>95</sup> Mo	11.01.2000	0,937 ± 0,037 <sub>2σ</sub>	1,17	10.04.2000	0,900 ± 0,087 <sub>2σ</sub>	1,13
<sup>99</sup> Tc	20.01.2000	1,07 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,34	10.04.2000	0,969 ± 0,189 <sub>2σ</sub>	1,22
<sup>101</sup> Ru	11.01.2000	1,28 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,60	10.04.2000	0,894 ± 0,144 <sub>2σ</sub>	1,12
<sup>106</sup> Ru	28.09.1999	0,0277 ± 0,0024 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,0346	01.07.1999	0,0245 ± 0,0037 <sub>2σ</sub>	0,0308
<sup>103</sup> Rh	08.12.1999	1,07 ± 0,03 <sub>2σ</sub>	1,34	10.04.2000	0,616 ± 0,061 <sub>2σ</sub>	0,772
<sup>109</sup> Ag	11.01.2000	0,109 ± 0,005 <sub>2σ</sub>	0,136	10.04.2000	0,165 ± 0,031 <sub>2σ</sub>	0,207
<sup>125</sup> Sb	28.09.1999	0,00389 ± 0,00017 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,00488	01.07.1999	0,00338 ± 0,00023 <sub>2σ</sub>	0,00423
<sup>129</sup> I	06.01.2000	0,0882 ± 0,0161 <sub>2σ</sub>	0,110	24.12.1999	0,224 ± 0,025 <sub>2σ</sub>	0,281
<sup>144</sup> Ce	28.09.1999	0,0124 ± 0,0013 <sub>2σ</sub>	0,0156	01.07.1999	0,0168 ± 0,0010 <sub>2σ</sub>	0,0211

<sup>1</sup> Dieses Massenverhältnis zum Messzeitpunkt ist in /PRI 03/ nur für die „main solution“ und ohne Unsicherheit gegeben. Hier aufgeführte Werte wurden aus den Verhältnissen der Massenteile im Brennstoff zum Messzeitpunkt in der „main solution“ und in der Summe aus „main solution“ und „residue solution“ errechnet.

<sup>2</sup> Massenanteil ist in /PRI 03/ nur zum Zeitpunkt des Bestrahlungsendes angegeben. Hier aufgeführter Wert zum Messzeitpunkt wurde mit dem Verhältnis der gegebenen Massenteile in der „main solution“ zum Messzeitpunkt und zum Bestrahlungsende zurückgerechnet.

**Tab. 2.80** Gemessene Massenverhältnisse zum jeweiligen Zeitpunkt der Messung für die Probe BM6 /PRI 03/

Die Angaben beziehen sich auf die Gesamtmasse des bestrahlten Brennstoffs bzw. den Massenanteil von  $^{238}\text{U}$  im bestrahlten Brennstoff. Die angegebenen Unsicherheiten entsprechen einem 95%-Konfidenzintervall ( $2\sigma$ ).

Nuklid	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>U</sub> <sup>1</sup>
$^{234}\text{U}$	08.02.2000	$0,0495 \pm 0,0066_{2\sigma}$	0,0619
$^{235}\text{U}$	08.02.2000	$0,956 \pm 0,042_{2\sigma}$	1,20
$^{236}\text{U}$	08.02.2000	$0,209 \pm 0,033_{2\sigma}$	0,261
$^{238}\text{U}$	08.02.2000	$798 \pm 12_{2\sigma}$	998
$^{237}\text{Np}$	15.09.1999	$0,125 \pm 0,002_{2\sigma}$	0,156
$^{238}\text{Pu}$	05.05.1999	$0,782 \pm 0,058_{2\sigma}$	0,978
$^{239}\text{Pu}$	05.05.1999	$13,3 \pm 0,1_{2\sigma}$	16,6
$^{240}\text{Pu}$	05.05.1999	$10,9 \pm 0,1_{2\sigma}$	13,6
$^{241}\text{Pu}$	05.05.1999	$4,56 \pm 0,04_{2\sigma}$	5,70
$^{242}\text{Pu}$	05.05.1999	$2,38 \pm 0,02_{2\sigma}$	2,98
$^{241}\text{Am}$	29.11.1999	$1,68 \pm 0,58_{2\sigma}$	2,11
$^{242(m)}\text{Am}$	29.11.1999	$0,0220 \pm 0,0078_{2\sigma}$	0,0275
$^{243}\text{Am}$	29.11.1999	$0,727 \pm 0,026_{2\sigma}$	0,910
$^{244}\text{Cm}$	29.11.1999	$0,278 \pm 0,007_{2\sigma}$	0,348
$^{245}\text{Cm}$	29.11.1999	$0,0297 \pm 0,0013_{2\sigma}$	0,0372
$^{246}\text{Cm}$	29.11.1999	$0,00241 \pm 0,00021_{2\sigma}$	0,00301
$^{142}\text{Nd}$	29.11.1999	$0,00934 \pm 0,00047_{2\sigma}$	0,0117
$^{143}\text{Nd}$	29.11.1999	$0,683 \pm 0,036_{2\sigma}$	0,854
$^{144}\text{Nd}$	27.05.1999	$0,829 \pm 0,039_{2\sigma}$	1,04
$^{145}\text{Nd}$	27.05.1999	$0,535 \pm 0,025_{2\sigma}$	0,670
$^{146}\text{Nd}$	27.05.1999	$0,552 \pm 0,028_{2\sigma}$	0,690
$^{148}\text{Nd}$	27.05.1999	$0,341 \pm 0,017_{2\sigma}$	0,426
$^{150}\text{Nd}$	27.05.1999	$0,198 \pm 0,011_{2\sigma}$	0,247
$^{147}\text{Pm}$	27.05.1999	$0,0532 \pm 0,0075_{2\sigma}$	0,0666
$^{147}\text{Sm}$	27.05.1999	$0,202 \pm 0,003_{2\sigma}$	0,253
$^{148}\text{Sm}$	23.12.1999	$0,146 \pm 0,002_{2\sigma}$	0,182
$^{149}\text{Sm}$	11.08.1999	$0,00466 \pm 0,00025_{2\sigma}$	0,00583
$^{150}\text{Sm}$	11.08.1999	$0,282 \pm 0,003_{2\sigma}$	0,352
$^{151}\text{Sm}$	11.08.1999	$0,0243 \pm 0,0004_{2\sigma}$	0,0304

Nuklid	Messdatum	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>u</sub> <sup>1</sup>
<sup>152</sup> Sm	11.08.1999	0,139 ± 0,003 <sub>2σ</sub>	0,173
<sup>154</sup> Sm	11.08.1999	0,0626 ± 0,0012 <sub>2σ</sub>	0,0783
<sup>151</sup> Eu	11.08.1999	8,30E-04 ± 0,47E-04 <sub>2σ</sub>	0,00104
<sup>153</sup> Eu	11.08.1999	0,152 ± 0,002 <sub>2σ</sub>	0,190
<sup>154</sup> Eu	11.08.1999	0,0321 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>	0,0401
<sup>155</sup> Eu	11.08.1999	0,00754 ± 0,00039 <sub>2σ</sub>	0,00943
<sup>154</sup> Gd	11.08.1999	0,0143 ± 0,0002 <sub>2σ</sub>	0,0179
<sup>155</sup> Gd	11.08.1999	0,00439 ± 0,00014 <sub>2σ</sub>	0,00549
<sup>156</sup> Gd	11.08.1999	0,0982 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>	0,123
<sup>158</sup> Gd	11.08.1999	0,0303 ± 0,0004 <sub>2σ</sub>	0,0379
<sup>160</sup> Gd	11.08.1999	0,00256 ± 0,00009 <sub>2σ</sub>	0,00320
<sup>133</sup> Cs	11.08.1999	1,08 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,35
<sup>134</sup> Cs	11.08.1999	0,0323 ± 0,0013 <sub>2σ</sub>	0,0404
<sup>135</sup> Cs	03.09.1999	0,858 ± 0,036 <sub>2σ</sub>	1,07
<sup>137</sup> Cs	03.09.1999	1,10 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	1,38
<sup>90</sup> Sr	03.09.1999	0,233 ± 0,007 <sub>2σ</sub>	0,292
<sup>95</sup> Mo	03.09.1999	0,627 ± 0,024 <sub>2σ</sub>	0,784
<sup>99</sup> Tc	07.10.1999	0,676 ± 0,031 <sub>2σ</sub>	0,846
<sup>101</sup> Ru	11.01.2000	0,784 ± 0,037 <sub>2σ</sub>	0,982
<sup>106</sup> Ru	20.01.2000	0,0176 ± 0,0015 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,0221
<sup>103</sup> Rh	11.01.2000	0,728 ± 0,028 <sub>2σ</sub>	0,910
<sup>109</sup> Ag	26.09.1999	0,141 ± 0,011 <sub>2σ</sub>	0,176
<sup>125</sup> Sb	08.12.1999	0,00285 ± 0,00011 <sub>2σ</sub> <sup>2</sup>	0,00357
<sup>129</sup> I	11.01.2000	0,0834 ± 0,0186 <sub>2σ</sub>	0,104
<sup>144</sup> Ce	26.09.1999	0,00863 ± 0,00086 <sub>2σ</sub>	0,0108

<sup>1</sup> Dieses Massenverhältnis zum Messzeitpunkt ist in /PRI 03/ nur für die „main solution“ und ohne Unsicherheit gegeben. Hier aufgeführte Werte wurden aus den Verhältnissen der Massenteile im Brennstoff zum Messzeitpunkt in der „main solution“ und in der Summe aus „main solution“ und „residue solution“ errechnet.

<sup>2</sup> Massenanteil ist in /PRI 03/ nur zum Zeitpunkt des Bestrahlungsendes angegeben. Hier aufgeführter Wert zum Messzeitpunkt wurde mit dem Verhältnis der gegebenen Massenteile in der „main solution“ zum Messzeitpunkt und zum Bestrahlungsende zurückgerechnet.

## 2.5.2 Modellierung

Aus den in Kap. 2.5.1 beschriebenen Daten wurden geeignete Rechenmodelle für die verschiedenen Proben erstellt, welche im Folgenden beschrieben werden. Aufgrund der nachträglich identifizierten Fehler in einzelnen Nuklidkonzentrationsmessungen des PSI an der Probe BM5 wurde hier auf einen Vergleich mit den Messdaten des PSI verzichtet und zunächst nur die Daten des SCK•CEN, d. h. der Probe BM5<sup>1</sup> genutzt.

### Allgemeine Parameter

Für alle durchgeführten Nachrechnungen mit MOTIVE sind einheitliche allgemeine Parameter, wie Neutronentransport- und Inventarcode, Wirkungsquerschnittsbibliothek, Predictor-Corrector-Methode, etc. gewählt worden. Diese Werte sind in Tab. 2.13 zusammengestellt. Zudem ist eine Liste mit Nukliden anzugeben, für welche die errechneten Konzentrationen auszugeben werden sollen. Hier wurden die Nuklide gewählt, für welche Messdaten vorliegen (Tab. 2.79 und Tab. 2.80).

### Modellgeometrie

Da beide hier betrachteten Proben aus demselben Brennstab stammen, wurde für beide Probennachrechnungen eine identische Modellgeometrie verwendet. Diese besteht in erster Linie aus einem unendlichen Gitter nahezu identischer Brennelemente, welches mithilfe eines einzelnen Brennelements mit reflektierenden Randbedingungen gebildet wurde. Das Modell ist dabei auf zwei Dimensionen beschränkt, d. h. in axialer Brennstabrichtung wurde das Modell nicht weiter unterteilt und ebenfalls durch reflektierende Randbedingungen abgeschlossen. Das Brennelement wurde gemäß Abb. 2.36 modelliert, wobei dieses Brennelement aufgrund des Instrumentierungsrohrs auf der Position G7 nur eine 1/2-Spiegelsymmetrie entlang der Brennstabgitterdiagonalen aufweist. Zwar würde diese Brennelementsymmetrie periodische Randbedingungen erfordern um tatsächlich identische Brennelemente zu modellieren, diese Möglichkeit besteht in MOTIVE allerdings noch nicht, so dass hier auf reflektierende Randbedingungen zurückgegriffen wurde, wodurch das modellierte Brennelementgitter genau genommen aus abwechselnd gespiegelten Brennelementen besteht. Ferner wird auf diese Weise ein Brennelementgitter aus ausschließlich MOX-Brennelementen aufgebaut, was allerdings der typischen Kernbeladung des Reaktors Beznau-I widerspricht, welche nach /PRI 03/ nur zu etwa einem Drittel MOX-Brennelemente enthält. Genaue Daten zur Kernbeladungen liegen aber nicht vor, um hier eine realistischere

Modellierung vorzunehmen, so dass hier auf die beschriebene Modellierung zurückgegriffen wurde.

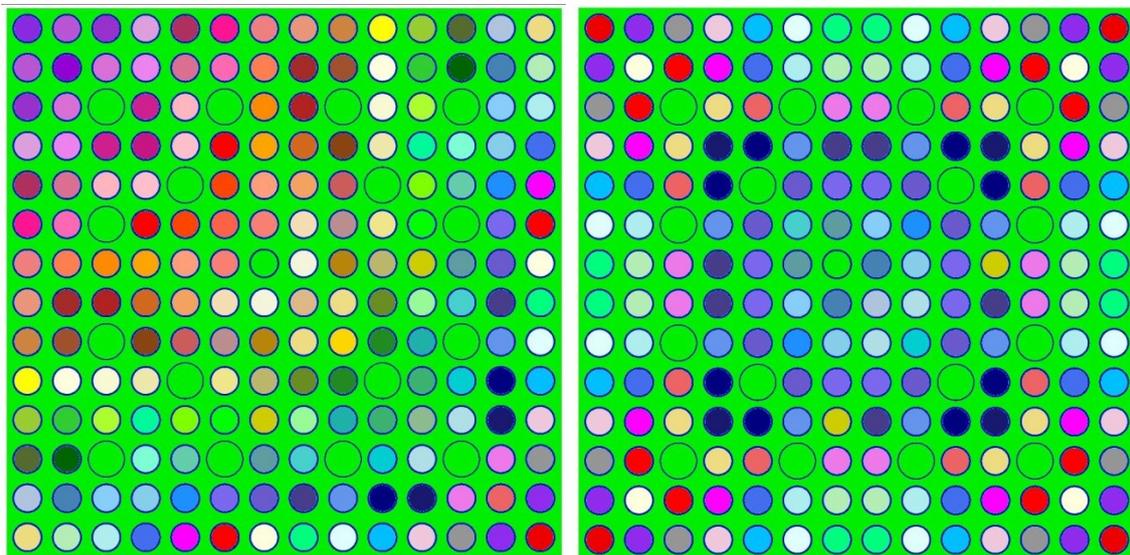
Die einzelnen Stäbe im Brennelement wurden separat modelliert, also durch eigene abzubrennende Materialien im Rechenmodell beschrieben, wobei Stäbe auf homologen Positionen zusammengefasst wurden. Auf diese Weise wurde ein detailliertes Rechenmodell unter Berücksichtigung der Spiegelsymmetrie mit 94 separat betrachteten Brennstäben erstellt. Aufgrund der großen Anzahl an unterschiedenen Stäben wurde zusätzlich ein zweites Rechenmodell mit einer vereinfachten Modellgeometrie entwickelt. In dieser vereinfachten Variante wurden die Stäbe mehrheitlich entsprechend der näherungsweise vorhandenen 1/8-Spiegelsymmetrie und lediglich die Stäbe auf und um der Position G7 entsprechend der eigentlichen 1/2-Spiegelsymmetrie modelliert, wodurch nur 32 Stäbe separat zu betrachten sind. Die sich für beide Varianten ergebenden Brennstabbelegungen in den jeweiligen Rechenmodellen sind in Abb. 2.37 für die detaillierte Variante und in Abb. 2.38 für die vereinfachte Variante dargestellt. Dabei gibt jeweils die Zahl 1 den Probenstab, die Zahlen 11 bis 103 bzw. 41 die übrigen Brennstäbe bzw. die abzubrennenden Materialien und die Zahlen 200 und 201 die Steuerstabführungsrohre bzw. das Instrumentierungsrohr wieder. Die Umsetzung dieser Rechenmodelle in KENO-VI-Geometriemodelle zeigt Abb. 2.39.

24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	12
45	44	200	43	42	200	41	40	200	39	38	200	26	13
55	54	53	52	51	50	1	49	48	47	46	38	27	14
63	62	61	60	200	59	58	57	56	200	47	39	28	15
71	70	200	69	68	67	66	65	64	56	48	200	29	16
79	78	77	76	75	74	73	72	65	57	49	40	30	17
85	84	83	82	81	80	201	73	66	58	1	41	31	18
90	89	200	88	87	86	80	74	67	59	50	200	32	19
94	93	92	91	200	87	81	75	68	200	51	42	33	20
98	97	96	95	91	88	82	76	69	60	52	43	34	21
100	99	200	96	92	200	83	77	200	61	53	200	35	22
102	101	99	97	93	89	84	78	70	62	54	44	36	23
103	102	100	98	94	90	85	79	71	63	55	45	37	24

**Abb. 2.37** Brennstabbelegung im detaillierten Rechenmodell für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I

11	12	13	14	15	16	17	17	16	15	14	13	12	11
12	18	19	20	21	22	23	23	22	21	20	19	18	12
13	19	200	24	25	200	26	26	200	25	24	200	19	13
14	20	24	27	28	29	1	30	29	28	27	24	20	14
15	21	25	28	200	31	32	32	31	200	28	25	21	15
16	22	200	29	31	33	34	38	39	31	29	200	22	16
17	23	26	30	32	35	36	37	38	32	30	26	23	17
17	23	26	30	32	41	201	36	34	32	1	26	23	17
16	22	200	29	31	40	41	35	33	31	29	200	22	16
15	21	25	28	200	31	32	32	31	200	28	25	21	15
14	20	24	27	28	29	30	30	29	28	27	24	20	14
13	19	200	24	25	200	26	26	200	25	24	200	19	13
12	18	19	20	21	22	23	23	22	21	20	19	18	12
11	12	13	14	15	16	17	17	16	15	14	13	12	11

**Abb. 2.38** Brennstabbelegung im vereinfachten Rechenmodell für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I



**Abb. 2.39** Schematische Darstellung der KENO-VI-Geometriemodelle für das detaillierte (links) und vereinfachte (rechts) Rechenmodell für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I

Die geometrischen Abmessungen bzw. Abstände der Brennstäbe, Steuerstabführungsrohre bzw. des Instrumentierungsrohrs und des Brennelements selbst sind entsprechend Tab. 2.71 modelliert worden. Der Zwischenraum („Gap“) zwischen Pellet und Hüllrohr wurde mitmodelliert, d. h. auf eine Berücksichtigung des Anschwellens der Pellets während des Abbrands („Swelling“) wurde verzichtet.

### Materialzusammensetzung

Die Brennstoffzusammensetzungen wurden weitgehend entsprechend den Angaben in /PRI 03/ modelliert. Das bedeutet, dass für den Plutoniumvektor die Angaben in

Tab. 2.72 für alle drei Brennstabgruppen („low Pu content“, „intermediate Pu content“ und „high Pu content“) herangezogen wurde, also wurde unterstellt, dass dieser sich für die verschiedenen Brennstäbe nicht wesentlich unterscheidet. Verunreinigungen, welche nur in Form eines Bor-Äquivalents angegeben wurden, wurden hier allerdings für alle Brennstabgruppen vernachlässigt. Da Angaben für die Plutoniumanteile für die „low Pu content“- und „intermediate Pu content“-Brennstäbe in /PRI 03/ fehlen, wurde hier der Argumentation in /KIL 08b/ gefolgt (vgl. Kap. 2.5.1, Abschnitt „Materialzusammensetzung“) und die entsprechenden Werte aus Tab. 2.74 übernommen. Dieses gilt auch für die „high Pu content“-Brennstäbe. Zwar gibt es für diese eine Angabe zum Plutoniumanteil in /PRI 03/, der dortige Wert deckt sich aber weitgehend mit dem Wert in Tab. 2.75, so dass hier letzterer genutzt wurde. Als Kompromiss aus den verschiedenen Angaben zur Brennstoffdichte (Tab. 2.73) wurde hier eine Dichte von  $10,25 \text{ g/cm}^3$  angenommen, was einer linearen Massenbelegung von  $6,948 \text{ g/cm}$  entspricht. Damit wird in guter Näherung die angegebene Massenbelegung reproduziert und gleichzeitig kann die angegebene Dichte als aufgerundeter Wert interpretiert und so auch diese Angabe berücksichtigt werden. Aus den angegebenen gewichtsanteiligen Zusammensetzungen wurden die Kernzahldichten errechnet, wobei dazu für Sauerstoff das mittlere Atomgewicht entsprechend der natürlichen Isotopenzusammensetzung genutzt wurde. Im Rechenmodell wurde aber zur Vereinfachung der Sauerstoff als  $100\% \text{ }^{16}\text{O}$  modelliert. Die verwendeten Zusammensetzungen sind im Einzelnen in Tab. 2.81 aufgeführt.

Das Hüllrohrmaterial ist laut /PRI 03/ Zirkalloy-4, ohne dass dort aber eine Zusammensetzung angegeben wurde. Daher wird hier die Zusammensetzung des Zircaloy-4 aus der SCALE Standard Composition Library /PET 16/ mit der dort angegebenen Dichte von  $6,56 \text{ g/cm}^3$  übernommen. Die konkrete verwendete Zusammensetzung ist in Tab. 2.65 (Kap. 2.4.2, Abschnitt „Materialzusammensetzung“) angegeben.

In Ermangelung entsprechender Informationen wurde angenommen, dass das Hüllrohr mit 30 bar Helium beaufschlagt wurde. Dementsprechend wurde im Rechenmodell Helium mit einer Kernzahldichte von  $7,4122\text{E-}04$  als Material im Zwischenraum zwischen Pellet und Hüllrohr („Gap“) eingesetzt. Für die Berechnung der Kernzahldichte wurde die natürliche Isotopenzusammensetzung des Heliums mit dem daraus resultierenden mittleren Atomgewicht genutzt, im Rechenmodell wurde aber zur Vereinfachung das Helium als reines  $^4\text{He}$  mit der genannten Kernzahldichte angenommen.

**Tab. 2.81** Verwendete nuklidweise Zusammensetzung des Brennstoffs für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I nach /PRI 03/

				Low Pu	intermediate Pu	High Pu
				Pu / (Pu + U) [wt.-%]		
				3,092	3,935	5,578
Element1 / Isotop	Mittlere Atom-masse [u]	Anteil im Element		Kernzahl-dichte2 [1/(barn*cm)]	Kernzahl-dichte2 [1/(barn*cm)]	Kernzahl-dichte2 [1/(barn*cm)]
		[wt.-%]	[at.-%]			
U	238,0437 <sup>3</sup>			2,1565E-02 <sup>4</sup>	2,1946E-02 <sup>4</sup>	2,2141E-02 <sup>4</sup>
234U	234,0409	0,002	0,002	4,3868E-07	4,4642E-07	4,5039E-07
235U	235,0439	0,231	0,234	5,0451E-05	5,1341E-05	5,1798E-05
238U	238,0508	99,767	99,764	2,1514E-02	2,1894E-02	2,2089E-02
Pu + Am	157,2521 <sup>3</sup>			1,2784E-03 <sup>4</sup>	8,9373E-04 <sup>4</sup>	7,0237E-04 <sup>4</sup>
238Pu	151,9198	0,603	0,607	7,7559E-06	5,4719E-06	4,3003E-06
239Pu	153,9209	66,086	66,211	8,4645E-04	5,9719E-04	4,6932E-04
240Pu	154,9226	23,198	23,145	2,9589E-04	2,0875E-04	1,6406E-04
241Pu	155,9221	6,554	6,512	8,3247E-05	5,8733E-05	4,6157E-05
242Pu	156,9240	2,643	2,615	3,3432E-05	2,3587E-05	1,8537E-05
241Am	157,9241	0,916	0,910	1,1635E-05	8,2086E-06	6,4511E-06
O	15,9994 <sup>3</sup>			4,5702E-02 <sup>4</sup>	4,5706E-02 <sup>4</sup>	4,5708E-02 <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sauerstoff wurde bei der Berechnung der Kernzahldichten als Element behandelt und nicht nuklidweise unterschieden; im Rechenmodell wurde es zu 100 % <sup>16</sup>O mit der gegebenen Kernzahldichte modelliert.

<sup>2</sup> Die berücksichtigten nuklidweisen Brennstoffzusammensetzungen sind durch die hellblau unterlegten Einträge gegeben.

<sup>3</sup> Mittleres Atomgewicht des jeweiligen Elements.

<sup>4</sup> Kernzahldichte des jeweiligen Elements (= Summe der Kernzahldichten der Isotope).

## Bestrahlungsgeschichte

Zur Modellierung der Bestrahlungsgeschichte, also des zeitlichen Verlaufs von Leistung, Brennstofftemperatur, Hüllrohrtemperatur, Moderatortemperatur und Borkonzentration, wurden die Werte aus Tab. 2.76 und Tab. 2.77 genutzt. Dazu wurde angenommen, dass diese Angaben jeweils über das jeweilige Zeitintervall gemittelte Werte sind (vgl. Kap. 2.5.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Die Unterteilung der Zeitschritte in Tab. 2.76 bzw. Tab. 2.77 wurde ebenfalls übernommen. Es wurde lediglich der erste Zeitschritt nochmals geteilt, so dass ein zusätzlicher kurzer Zeitschritt von 0,1 Tag zu Beginn jedes Zyklus entstand. Als Leistungsverlauf wurde die gegebene mittlere Probenleistung herangezogen und als Brennstofftemperatur der Mittelwert der beiden gegebenen Brennstofftemperaturen genutzt. Um den messtechnisch ermittelten Endabbrand der Proben in den Abbrandrechnungen zu erzielen, wurden die Leistungswerte

te jeder Probe mit einem über die gesamte Leistungsgeschichte konstanten Faktor skaliert, so dass die für den Abbrandindikator  $^{148}\text{Nd}$  rechnerisch erzielte Nuklidkonzentration mit dem jeweiligen für die Probe gemessenen Wert innerhalb von 0,2 % übereinstimmt. Weitere Änderungen an den angegebenen Werten wurden nicht vorgenommen. Die so resultierenden Bestrahlungsgeschichten sind in Tab. 2.82 zusammengefasst. Die dort angegebenen relativen Leistungen je Zeitschritt beziehen sich auf das Maximum der jeweiligen Leistungsgeschichte, welches weitgehend unabhängig vom verwendeten Rechenmodell (detailliertes oder vereinfachtes Rechenmodell, Abb. 2.39) für die Probe BM5' mit einem Wert von etwa 37,26 MW/tHM in der Mitte von Zyklus 23 und für die Probe BM6 mit einem Wert von etwa 24,45 MW/tHM am Ende des Zyklus 23 auftritt<sup>10</sup>.

Die Wahl, die gegebenen Probenstableistungen anstelle der Brennelement-gemittelten Leistungen für die Nachrechnungen heranzuziehen, erfolgte hier trotz der in MOTIVE bislang fehlenden Möglichkeit, den für die Rechnung gegebenen Leistungsverlauf einem speziellen Stab zuzuordnen. So bezieht MOTIVE bisher die vom Anwender angegebene Leistung grundsätzlich auf das gesamte Rechenmodell, was hier für die Verwendung der brennelementgemittelten Leistungsverläufe sprechen würde. Der Vergleich der in /PRI 03/ gegebenen Brennelement-gemittelten Leistungen mit den jeweiligen Probenstableistungen lässt aber vermuten, dass während der ersten drei Zyklen, in welchen das Brennelement M308 am Rand des Reaktorkerns positioniert war, ein merklicher horizontaler Leistungsgradient im Brennelement vorlag (vgl. Kap. 2.5.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Ein solcher Leistungsgradient ist aber mit dem hier gewählten Rechenmodell eines infiniten Gitters aus identischen Brennelementen nicht zu reproduzieren. Um in der Nachrechnung dennoch den tatsächlichen Leistungsverlauf des Probenstabs zumindest näherungsweise nachbilden zu können, wurden hier die gegebenen Probenstableistungen für die Nachrechnungen herangezogen, auch wenn diese für die ersten drei Zyklen aufgrund des zu vermutenden Leistungsgradienten nicht für das gesamte Brennelement repräsentativ sind und so ggf. ein gewisser Fehler in die Nachrechnungen eingebracht wird. Für die letzten drei Zyklen gleichen sich Brennelement-gemittelte Leistung und Probenstableistung allerdings an, so dass für diese Zyklen die Verwendung der Probenstableistungen in den Nachrechnun-

---

<sup>10</sup> Die jeweils angepassten Leistungen unterscheiden sich für beide Rechenmodelle (detailliertes oder vereinfachtes Rechenmodell, Abb. 2.39) um weniger als 0,05 MW/tHM. Die im Text gegebenen Werte sind die jeweiligen Mittelwerte für die einzelnen Proben.

gen weniger problematisch sein sollte. Um den Effekt des Leistungsgradienten realistischer nachbilden zu können, wären zumindest für die ersten drei Zyklen zusätzlich zur Modellierung des Brennelements M308 auch die Modellierung dessen Umgebung nötig, d. h. die Modellierung der benachbarten Brennelemente bzw. der Kernumfassung und eines Wasserreflektors an den Stellen, an denen sich keine Brennelemente mehr befinden. Hierzu enthält /PRI 03/ aber keine weiteren Informationen, so dass auch für dieses Vorgehen Annahmen getroffen werden müssten.

Bislang ist es in MOTIVE nur möglich, eine einheitliche Brennstofftemperatur für alle Brennstoffmaterialien anzugeben, wodurch in den Nachrechnungen allen Brennstäben dieselbe Brennstofftemperatur zugeordnet wird. Insbesondere aufgrund des hier vermuteten Leistungsgradienten in den ersten drei Zyklen ist aber zu erwarten, dass die Brennstäbe entsprechend ihrer Leistung bei der Bestrahlung unterschiedliche Temperaturen aufwiesen. So wird durch dieses Vorgehen ebenfalls ein gewisser Fehler in die Nachrechnungen eingebracht. Die Maßgabe, die Abbrandrechnung möglichst mit den gegebenen Daten durchzuführen, lässt sich mit der derzeitigen MOTIVE-Version aber nur in dieser Weise erfüllen.

Zusätzlich zur Moderatortemperatur wurde der nominelle Moderatordruck von 158,2 bar zur Berechnung der Moderatordichte verwendet. Dementsprechend wurde die zusätzlich in /PRI 03/ angegebene Moderatordichte nicht weiter berücksichtigt, bzw. durch eine aktuelle Parametrisierung der Wasserzustandsgleichung neu berechnet (vgl. Kap. 2.5.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“).

Als Zerfallszeit nach Ende der Bestrahlung wird für jedes Nuklid dessen individueller Zeitraum zwischen Ende der Bestrahlung und Zeitpunkt der Messung berücksichtigt. Die im Einzelnen in der Nachrechnung herangezogenen Abklingzeiten sind in Tab. 2.83 zusammengestellt.

**Tab. 2.82** Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 20 bis 25 für das Brennelement M308 des Reaktors Beznau-I nach /PRI 03/

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Probe BM5'			Probe BM6		
				Moderator-temperatur [K]	Mittl. Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum	Moderator-temperatur [K]	Mittl. Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum
20	1,0	1,0	1099	559	655,5	17,886	557	603,5	12,281
	1,5	2,5	944	561	725,0	37,398	557	658,5	26,901
	2,0	4,5	822	564	852,5	58,943	558	704,5	45,029
	1,0	5,5	712	567	942,0	82,520	558	755,5	66,667
	1,0	6,5	933	561	726,0	39,024	557	664,5	28,655
	110,0	116,5	560	567	939,0	80,488	558	761,5	68,421
	0,5	117,0	492	564	847,5	58,537	558	718,5	52,632
	76,0	193,0	286	567	934,5	80,081	559	798,5	76,023
	0,5	193,5	415	561	717,0	36,179	557	675,5	32,749
	23,0	216,5	147	567	924,5	77,642	559	794,5	75,439
	0,2	216,7	356	561	717,0	36,179	557	675,5	32,749
	3,5	220,2	111	567	924,0	77,642	559	798,0	76,023
	0,5	220,7	225	564	825,0	56,098	558	716,5	53,801
	69,5	290,2	24	568	923,0	78,455	559	812,0	78,947
17,6	307,8	90	567	907,0	75,610	558	795,0	76,023	
Revision	54,2	362,0				0,000			0,000

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Probe BM5'			Probe BM6		
				Moderatortemperatur [K]	Mittl. Brennstofftemperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum	Moderatortemperatur [K]	Mittl. Brennstofftemperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum
21	0,5	362,5	1400	558	636,0	15,447	557	594,0	10,526
	2,0	364,5	1244	560	708,5	31,707	557	638,5	22,222
	1,5	366,0	1114	562	778,5	50,813	558	681,0	37,427
	1,0	367,0	1044	563	861,0	63,415	558	709,5	47,953
	1,0	368,0	1020	563	873,0	67,886	558	713,5	52,047
	2,5	370,5	1015	564	873,0	67,886	558	714,0	52,632
	0,5	371,0	1111	562	766,0	49,593	558	680,0	36,842
	12,0	383,0	986	564	873,5	68,293	558	714,5	53,216
	0,5	383,5	1072	562	770,0	49,593	558	680,5	37,427
	51,5	435,0	889	564	871,0	68,293	558	717,0	54,971
	1,0	436,0	915	562	765,0	49,187	558	684,0	39,181
	138,0	574,0	617	564	862,5	67,886	558	726,0	59,649
	0,2	574,2	506	562	775,0	51,220	558	711,5	46,784
	83,0	657,2	306	564	857,0	67,480	558	740,0	64,912
	1,0	658,2	435	560	702,0	30,894	557	665,0	28,070
66,0	724,2	102	564	855,5	67,886	558	746,5	67,251	
Revision	68,8	793				0,000			0,000

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Probe BM5'			Probe BM6		
				Moderatortemperatur [K]	Mittl. Brennstofftemperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum	Moderatortemperatur [K]	Mittl. Brennstofftemperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum
22	0,5	793,5	1071	558	655,0	17,073	557	605,0	12,865
	2,0	795,5	916	561	715,0	35,366	557	663,0	27,485
	2,0	797,5	784	563	812,5	56,911	558	711,5	46,784
	2,0	799,5	711	565	866,5	71,545	558	730,0	61,404
	35,0	834,5	622	566	896,5	78,455	558	753,0	69,006
	38,0	872,5	508	566	892,0	77,642	558	759,0	70,760
	1,0	1873,5	677	561	717,0	35,772	557	672,0	30,409
	129,2	1002,7	258	566	874,5	74,390	558	756,0	70,760
Revision	100,3	1103,0				0,000			0,000
23	8,0	1111,0	1211	562	750,0	47,967	557	682,0	38,012
	68,9	1179,9	850	568	928,5	99,593	559	830,5	87,135
	2,5	1182,4	947	562	770,0	50,813	557	697,5	43,860
	4,0	1186,4	718	568	929,5	97,967	559	841,5	90,643
	5,0	1191,4	702	569	928,5	100,000	559	849,0	94,737
	2,0	1193,4	914	562	768,0	50,407	557	698,0	43,860
	59,9	1253,3	594	569	929,5	97,154	559	843,5	92,398
	59,9	1313,2	402	569	931,0	97,561	559	848,5	98,830
	59,9	1373,1	224	569	941,5	95,122	559	849,5	100,000
	49,9	1423,0	66	569	957,0	93,089	559	844,5	100,000
20,0	1443,0	50	566	888,0	75,610	558	796,5	80,117	
Revision	48,0	1491,0				0,000			0,000

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Probe BM5'			Probe BM6		
				Moderator-temperatur [K]	Mittl. Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum	Moderator-temperatur [K]	Mittl. Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum
24	6,0	1497,0	1203	561	715,0	36,992	557	666,0	28,070
	2,0	1499,0	1063	563	816,0	58,943	558	703,0	45,614
	1,0	1500,0	1044	564	822,5	62,602	558	711,5	49,708
	86,7	1586,7	784	567	920,0	85,366	558	767,0	73,684
	86,6	1673,3	495	568	910,0	85,772	559	808,0	83,041
	86,7	1760,0	229	568	901,0	84,146	559	821,5	87,719
	1,0	1761,0	366	561	721,5	36,585	557	683,5	35,088
	44,8	1805,8	38	567	892,0	80,081	559	813,0	84,795
	1,1	1806,9	3	568	897,0	82,520	559	828,0	90,643
	16,8	1823,7	3	567	888,5	78,049	559	814,5	85,380
	1,6	1825,3	3	561	720,0	34,553	557	684,0	35,088
Revision	28,7	1854,0				0,000			0,000

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Probe BM5'			Probe BM6		
				Moderator-temperatur [K]	Mittl. Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum	Moderator-temperatur [K]	Mittl. Brennstoff-temperatur [K]	Rel. Leistung bez. Maximum
25	7,8	1861,8	1160	560	710,5	31,301	557	664,0	27,485
	60,6	1922,4	827	565	852,0	67,073	558	737,5	63,158
	1,0	1923,4	951	561	717,5	32,927	557	674,0	30,994
	57,6	1981,0	627	566	860,5	69,106	558	762,5	70,760
	57,6	2038,6	442	567	873,5	72,764	559	796,5	78,947
	1,0	2039,6	462	564	801,0	53,659	558	721,0	57,310
	53,7	2093,3	272	567	868,0	71,545	559	802,5	80,702
	1,0	2094,3	434	561	727,5	34,146	557	687,0	36,257
	65,4	2159,7	102	567	865,0	71,138	559	805,5	81,287
	1,0	2160,7	8	567	877,0	73,984	559	811,5	87,719
	20,5	2181,2	30	566	850,0	67,480	559	800,0	79,532
1,0	2182,2	246	560	714,0	28,862	557	677,0	31,579	

**Tab. 2.83** Berücksichtigte dividuelle Zerfallszeiten der errechneten Nuklidkonzentrationen der Proben BM5' und BM6 aus dem Brennelement M308 des Reaktors Beznau-I nach /PRI 03/

Nuklid	Abklingzeit [d]		Nuklid	Abklingzeit [d]	
	BM5'	BM6		BM5'	BM6
<sup>234</sup> U	1026	1320	<sup>149</sup> Sm	1137	1139
<sup>235</sup> U	1026	1320	<sup>150</sup> Sm	1137	1139
<sup>236</sup> U	1026	1320	<sup>151</sup> Sm	1137	1139
<sup>238</sup> U	1026	1320	<sup>152</sup> Sm	1137	1139
<sup>237</sup> Np	1174	1174	<sup>154</sup> Sm	1137	1139
<sup>238</sup> Pu	1040	1041	<sup>151</sup> Eu	1137	1139
<sup>239</sup> Pu	1040	1041	<sup>153</sup> Eu	1137	1139
<sup>240</sup> Pu	1040	1041	<sup>154</sup> Eu	1137	1139
<sup>241</sup> Pu	1040	1041	<sup>155</sup> Eu	1137	1139
<sup>242</sup> Pu	1040	1041	<sup>154</sup> Gd	1137	1139
<sup>244</sup> Pu	–	–	<sup>155</sup> Gd	1137	1139
<sup>241</sup> Am	1246	1249	<sup>156</sup> Gd	1137	1139
<sup>242(m)</sup> Am	1246	1249	<sup>158</sup> Gd	1137	1139
<sup>243</sup> Am	1246	1249	<sup>160</sup> Gd	1137	1139
<sup>242</sup> Cm	1246	1249	<sup>133</sup> Cs	1161	1162
<sup>243</sup> Cm	1246	1249	<sup>134</sup> Cs	1161	1162
<sup>244</sup> Cm	1246	1249	<sup>135</sup> Cs	1161	1162
<sup>245</sup> Cm	1246	1249	<sup>137</sup> Cs	1161	1162
<sup>246</sup> Cm	1246	1249	<sup>90</sup> Sr	1195	1196
<sup>142</sup> Nd	1067	1063	<sup>95</sup> Mo	1292	1292
<sup>143</sup> Nd	1067	1063	<sup>99</sup> Tc	1301	1301
<sup>144</sup> Nd	1067	1063	<sup>101</sup> Ru	1292	1292
<sup>145</sup> Nd	1067	1063	<sup>106</sup> Ru	1187	1185
<sup>146</sup> Nd	1067	1063	<sup>103</sup> Rh	1258	1258
<sup>148</sup> Nd	1067	1063	<sup>109</sup> Ag	1292	1292
<sup>150</sup> Nd	1067	1063	<sup>125</sup> Sb	1187	1185
<sup>147</sup> Pm	1273	1273	<sup>129</sup> I	1287	1287
<sup>147</sup> Sm	1137	1139	<sup>144</sup> Ce	1187	1185
<sup>148</sup> Sm	1137	1139			

### 2.5.3 Resultate

Die aufgrund der nicht exakten 1/8-Brennelementsymmetrie betrachteten zwei Rechenmodelle (detailliertes und vereinfachtes Rechenmodell, Abb. 2.39) zeigen in ihren Resultaten nur geringe Unterschiede. So weichen die errechneten Nuklidkonzentrationen für alle Nuklide deutlich weniger als 1,0 % voneinander ab, in den meisten Fällen liegt diese Abweichung sogar nur bei etwa 0,1 %. Im Vergleich mit den Messwerten können diese Abweichungen zwischen den Rechenmodellen vernachlässigt werden, so dass hier jeweils nur die Resultate des vereinfachten Rechenmodells mit den Messergebnissen verglichen wurden.

Die Ergebnisse der Nachrechnungen sind in Tab. 2.84 und in graphischer Form in Abb. 2.40 und Abb. 2.41 gezeigt. Die beiden Proben zeigen ein verschiedenes Bild. Bei der Probe BM5' werden  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  gut getroffen, wobei  $^{235}\text{U}$  in dem MOX-Brennstoff eine eher untergeordnete Rolle spielt. Auch die übrigen Aktinoide weisen mit Ausnahme von  $^{244}\text{Pu}$  eine überdurchschnittlich gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment auf. Gleiches gilt für viele Spaltprodukte, so zum Beispiel die Samarium-Nuklide. Bei einigen metallischen Spaltprodukten wie z. B. Rhodium und Ruthenium kommt es hingegen zu größeren Abweichungen.

**Tab. 2.84** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %

	<b>BM5'</b>	<b>BM6</b>		<b>BM5'</b>	<b>BM6</b>
<sup>234</sup> U	8,2	6,7	<sup>133</sup> Cs	4,5	-0,2
<sup>235</sup> U	1,5	0,9	<sup>134</sup> Cs	-4,3	-12,0
<sup>236</sup> U	-3,1	-3,4	<sup>135</sup> Cs	1,7	-2,3
<sup>238</sup> U	0,0	0,0	<sup>137</sup> Cs	-0,6	-6,4
<sup>237</sup> Np	0,1	5,4	<sup>142</sup> Nd	-0,8	13,6
<sup>238</sup> Pu	5,7	12,8	<sup>143</sup> Nd	0,7	7,3
<sup>239</sup> Pu	2,3	7,6	<sup>144</sup> Nd	-2,6	2,5
<sup>240</sup> Pu	0,5	7,7	<sup>145</sup> Nd	-0,4	2,5
<sup>241</sup> Pu	0,5	5,7	<sup>146</sup> Nd	-1,7	0,1
<sup>242</sup> Pu	0,4	6,4	<sup>148</sup> Nd	-0,5	-0,6
<sup>244</sup> Pu	-54,9	-	<sup>150</sup> Nd	-0,2	2,6
<sup>241</sup> Am	17,9	-6,1	<sup>147</sup> Pm	-7,3	6,7
<sup>242m1</sup> Am	-10,1	-33,3	<sup>147</sup> Sm	3,0	-5,4
<sup>243</sup> Am	3,6	-17,7	<sup>148</sup> Sm	-2,9	-12,1
<sup>242</sup> Cm	-7,6	-	<sup>149</sup> Sm	10,1	-0,4
<sup>243</sup> Cm	13,2	-	<sup>150</sup> Sm	2,1	-6,8
<sup>244</sup> Cm	-7,0	-3,4	<sup>151</sup> Sm	1,5	-8,1
<sup>245</sup> Cm	1,2	-2,0	<sup>152</sup> Sm	2,1	-5,6
<sup>246</sup> Cm	-15,4	-18,9	<sup>154</sup> Sm	5,5	-9,9
<sup>90</sup> Sr	0,3	-13,1	<sup>151</sup> Eu	-25,9	-23,5
<sup>95</sup> Mo	-2,8	-9,4	<sup>153</sup> Eu	-3,0	-5,6
<sup>99</sup> Tc	12,9	8,0	<sup>154</sup> Eu	9,0	-9,8
<sup>101</sup> Ru	35,3	-1,3	<sup>155</sup> Eu	-7,8	-14,1
<sup>106</sup> Ru	36,9	5,2	<sup>154</sup> Gd	-	-4,2
<sup>103</sup> Rh	62,2	0,0	<sup>155</sup> Gd	8,6	-8,3
<sup>109</sup> Ag	-	20,6	<sup>156</sup> Gd	-	-10,6
<sup>125</sup> Sb	-	38,3	<sup>158</sup> Gd	-	0,7
<sup>129</sup> I	-	145,4	<sup>160</sup> Gd	-	-5,9

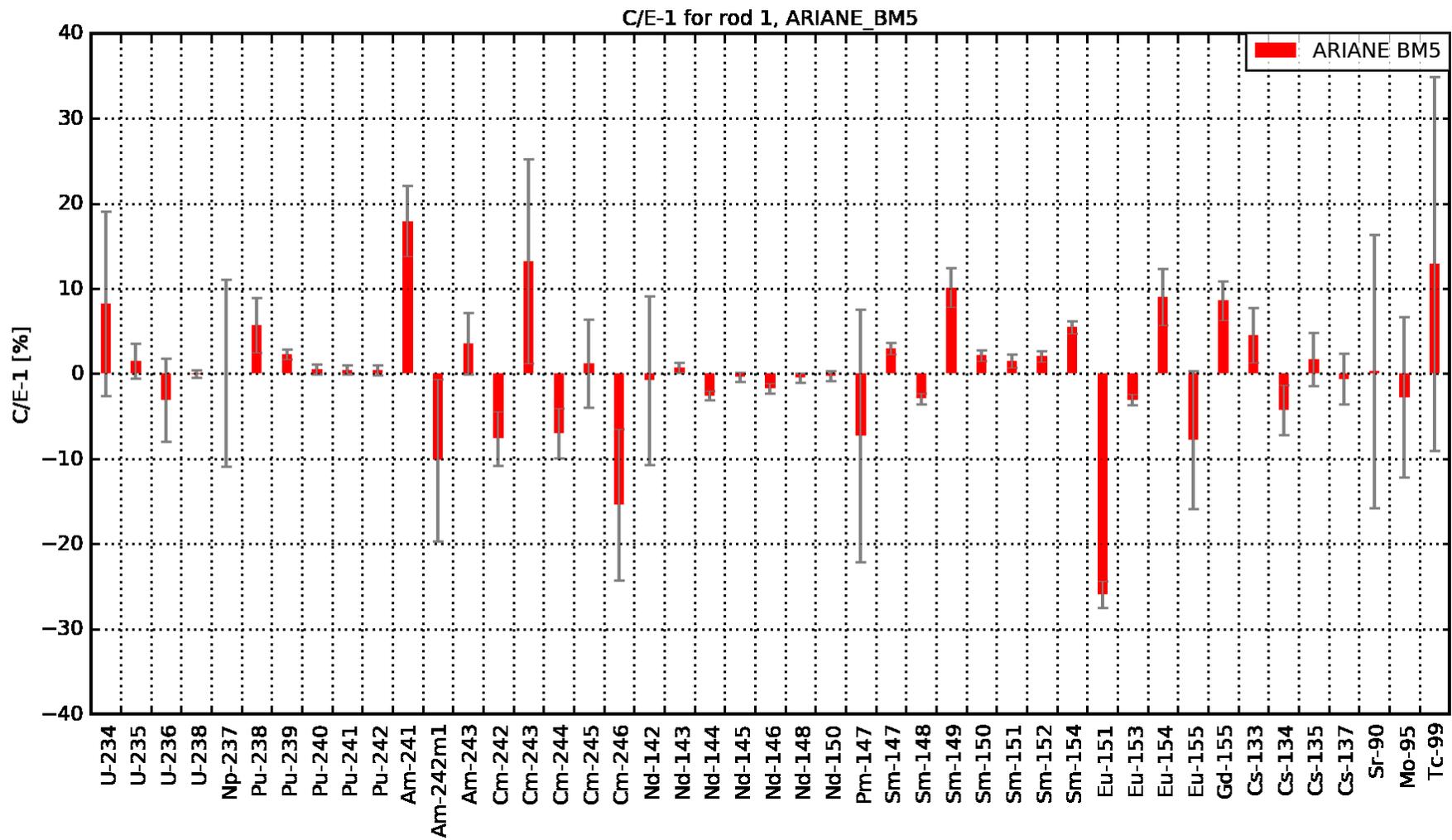


Abb. 2.40 ARIANE, BM5<sup>4</sup>: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

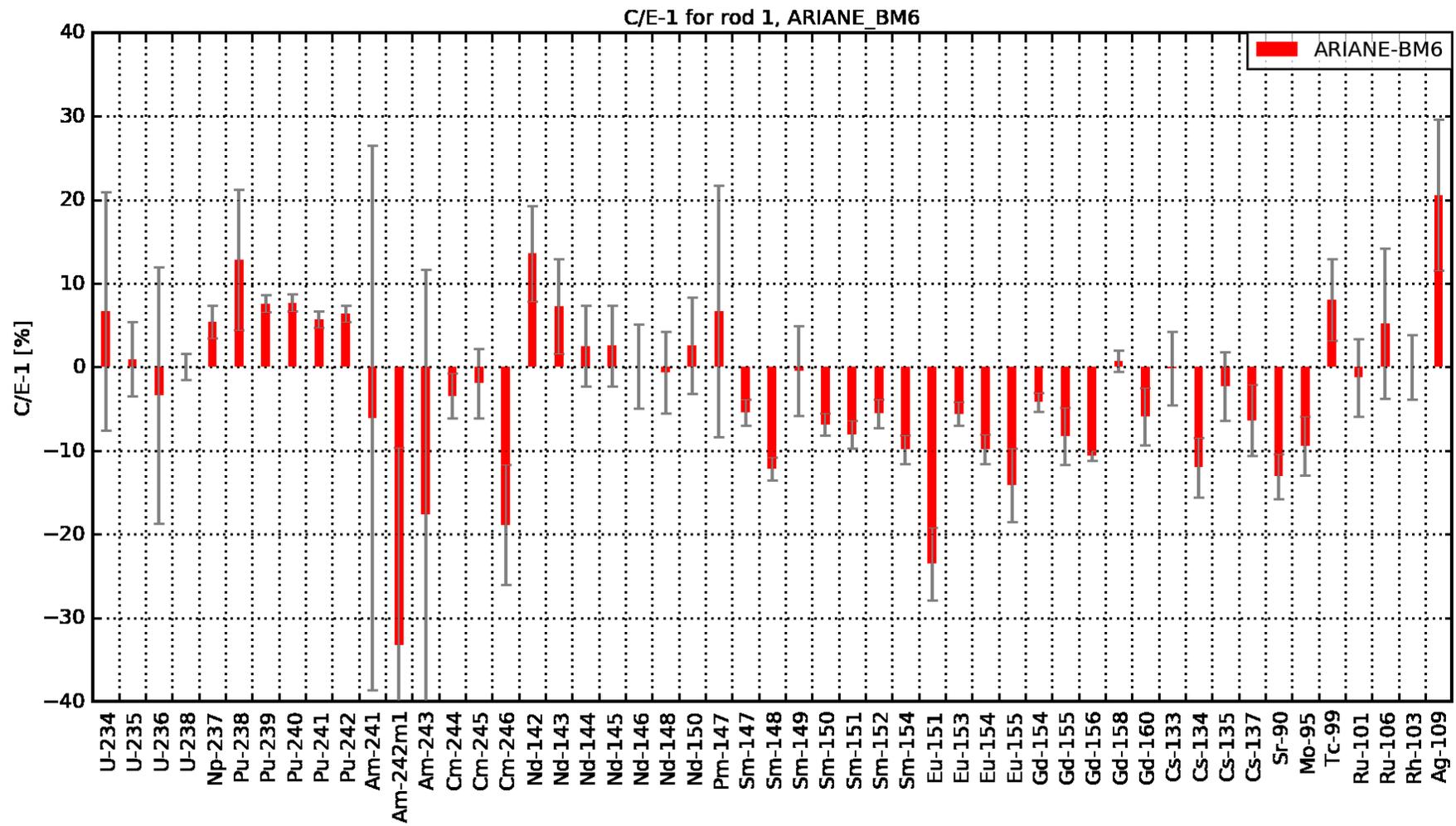


Abb. 2.41 ARIANE, BM6: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

Bei der Probe BM6 ist dagegen eine deutliche Überschätzung der  $^{239}\text{Pu}$ -Konzentration durch die Rechnung zu beobachten. Auch die übrigen Plutonium-Nuklide werden überschätzt. Da gleichzeitig viele der Spaltprodukte unterschätzt werden, liegt die Vermutung nahe, dass durch die Kalibrierung auf  $^{148}\text{Nd}$  ein zu geringer Abbrand in der Rechnung erzielt wurde. Die große Messunsicherheit für dieses Nuklid würde einen gewissen Spielraum bei der Festlegung des Zielabbrands bieten. Zur Wahrung der Konsistenz mit den anderen Nachrechnungen wurde hierauf allerdings verzichtet.

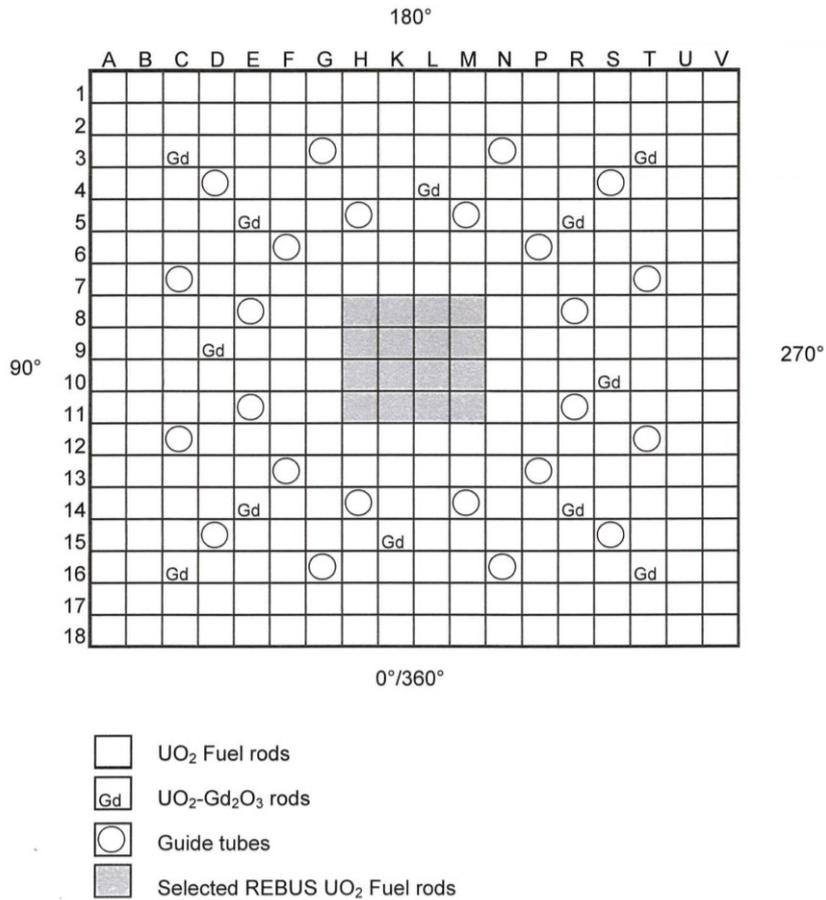
Erwähnenswert bei der Probe BM6 ist außerdem die gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment bei den Nukliden  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{101}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  und  $^{103}\text{Rh}$ . Große Abweichungen treten hingegen bei  $^{125}\text{Sb}$  und  $^{129}\text{I}$  zu Tage.

## **2.6 Probe des Gemeinschaftskraftwerks Neckarwestheim II (GKN-II) aus dem REBUS-Programm**

Im REBUS-Programm wurden Reaktivitätsmessungen an bestrahlten  $\text{UO}_2$ - und MOX-Brennstäben im VENUS-Nullleistungsreaktor der SCK-CEN in Mol, Belgien vorgenommen, um die Daten zur Validierung, z. B. von Kritikalitätscodes für Abbrandkreditanwendungen, bereitzustellen. U. a. wurden hierzu die zentralen 16 Stäbe des Brennelements 419 des Gemeinschaftskraftwerks Neckarwestheim II (GKN-II) verwendet. Diese Stäbe wurden dazu dem Brennelement entnommen und aus deren zentralen Abschnitten von zwei Metern Länge jeweils zwei einen Meter lange verkürzte Brennstäbe für den VENUS-Reaktor hergestellt. Da für die Nachrechnungen der Reaktivitätsmessungen eine gute Charakterisierung der Brennstäbe bzw. des bestrahlten Brennstoffs notwendig ist, wurden die Stäbe zusätzlich gammaspektroskopisch sowie der Stab an der Position M11 auch radiochemisch untersucht (Abb. 2.42). Dazu wurde vom letzteren Brennstab eine einzelne Probe von drei Pellets zwischen 105,5 cm und 108,5 cm vom oberen Brennstabende entfernt entnommen<sup>11</sup> /SCK 04/, /SCK 06/, /SCK 05a/.

---

<sup>11</sup> Im Bericht /SCK 04/ wird die Entnahme von zwei im Brennstab nebeneinanderliegenden Proben erwähnt, ein „primary sample“ zwischen ca. 105,5 cm und 108,5 cm und ein „spare sample“ zwischen ca. 101,0 cm und 105,5 cm. Der Bericht zur radiochemischen Analyse verweist aber nur auf das sog. primary sample, so dass vermutlich das zweite Sample nicht analysiert wurde.



**Abb. 2.42** Schematische Darstellung des Brennelements 419 aus GKN-II /SCK 05b/

### 2.6.1 Experimentelle Daten

In /SCK 05b/, Tabelle 1.3 und 1.4, sind die Reaktor- und Brennelementdaten für eine Abbrandrechnung mit WIMPS zusammengestellt worden, so dass /SCK 05b/ eine wesentliche Quelle für die hier durchgeführten Nachrechnungen darstellt. Ferner sind weitere Angaben in /SCK 04/ und /SCK 05a/ enthalten. Die radiochemischen Messdaten sind dagegen in /SCK 06/ zusammengefasst.

#### Reaktordaten

Das Gemeinschaftskraftwerk Neckarwestheim II (GKN-II) ist ein Druckwasserreaktor der Konvoi-Baureihe mit einer nominellen thermischen Leistung von 3850 MW bzw. einer nominellen elektrischen Leistung von 1400 MW. Die weiteren für die Probennachrechnung relevanten Reaktordaten sind /SCK 05b/ entnommen und in Tab. 2.85 zusammengefasst.

**Tab. 2.85** Relevante Reaktordaten des GKN-II /SCK 05b/

Parameter	
Nomineller Kühlmitteldruck [bar]	158
Kühlmitteleinlasstemperatur [°C]	291,7
Kühlmittelauslasstemperatur [°C]	327,5

### **Brennelement**

Das Brennelement 419 aus GKN-II ist ein 18 × 18-DWR-Brennelement aus UO<sub>2</sub>-Brennstoff mit 288 Brennstäben mit einheitlicher <sup>235</sup>U-Anreicherung und zwölf Gd-haltigen Brennstäben mit einer verringerten <sup>235</sup>U-Anreicherung sowie 24 Steuerstabführungs- bzw. Instrumentierungsrohren (Abb. 2.42) /SCK 05b/. Angaben zu den geometrischen Abmessungen des Brennelements bzw. der Brennstäbe und Steuerstabführungs- bzw. Instrumentierungsrohre sind ebenfalls in /SCK 05b/ enthalten und in Tab. 2.86 wiedergegeben. Der Bericht /SCK 05b/ verweist als Quelle für die enthaltenen Angaben auf einen zu derzeit noch zu veröffentlichenden Bericht, ohne dafür aber eine explizite Referenz anzugeben. Die Referenzliste enthält allerdings eine frühere Version von 2002 des Berichts /SCK 05a/, ohne diese Referenz im Text zu verwenden. Es ist daher zu vermuten, dass mit dem zu veröffentlichenden Bericht /SCK 05a/ gemeint ist.

So enthält auch /SCK 05a/ entsprechende Angaben zu Pellet- und Hüllrohrgeometrie. Die frei verfügbare Version dieses Berichtes besteht aber lediglich aus einem Kapitel 6 mit der Bezeichnung „U 3.8 w% GKN fresh fuel pins“ sowie aus einem Kapitel 7 mit der Bezeichnung „U 3.8 w% GKN refabricated irradiated fuel pins“ und ist offensichtlich nur ein Auszug eines größeren Berichts, der Brennstoffe für die Messungen im VENUS-Reaktor beschreibt. Beide genannten Kapitel bestehen hauptsächlich aus Tabellen, zu welchen nur sporadisch knappe weitere Erklärungen gegeben werden, so dass keine direkte Zuordnung der enthaltenen Angaben zum jeweiligen Kontext gegeben ist. Dem Augenschein nach beschreibt Kapitel 6 aber ca. 1 m lange Brennstäbe mit frischem Brennstoff, die vermutlich für Messungen im VENUS-Reaktor hergestellt und genutzt wurden. Zwar spricht Kapitel 6 hauptsächlich von „fresh fuel pins“, an zwei Stellen wird aber dennoch auch von „refabricated irradiated fuel pins“ gesprochen. Hierbei könnte es sich allerdings um "copy and paste"-Fehler handeln. So bezieht sich eine Erwähnung der „refabricated irradiated fuel pins“ auf eine Tabelle zur Hüllrohrzusammensetzung, die ebenfalls im Kapitel 7 „U 3,8 w% GKN refabricated irradiated fuel pins“ aufgeführt wird. Die zweite Erwähnung verweist in einer Textpassage in Kapitel 6 auf

eine Abbildung 3 dieses Kapitels, welche der Textpassage nach einem Querschnitt durch „refabricated irradiated fuel pins“ zeigen soll, wohingegen die zugehörige Abbildungsunterschrift aber von einem Querschnitt durch „fresh fuel pins“ spricht. Dagegen spricht Kapitel 7 durchweg von „refabricated irradiated fuel pins“ und verweist dabei u. a. auf die Bestrahlungshistorie des Brennstoffs im Bericht /SCK 05b/ (s. u.). Zusätzlich ist im Kapitel 7.1.3 „U 3.8 w% irradiated fuel (fresh state)“ eine Zuordnung von zwei aufgeführten unbestrahlten Brennstoffzusammensetzungen mit Brennstabpositionen H8 bis H11, K8 bis K11, L8 bis L11 und M8 bis M11 angegeben. So sind die Brennstabpositionen H8 bis M11 gerade die 16 Positionen des Brennelements 419, deren Brennstäbe für die Messungen am VENUS-Reaktor verwendet wurden. Somit scheint Kapitel 7 augenscheinlich die Brennstäbe des Brennelements 419 zu beschreiben. Geometrieangaben zu Pellet und Hüllrohr sind in /SCK 05a/ aber nur im Kapitel 6 enthalten und sind somit nicht zwingend auf die Brennstäbe des Brennelements 419 zu beziehen. Allerdings liegt hier die Vermutung nahe, dass die in Kapitel 6 beschriebenen Stäbe zum Reaktivitätsvergleich mit den bestrahlten Stäben des Brennelements 419 im VENUS-Reaktor herangezogen wurden, und somit vermutlich möglichst identisch zu den Brennstäben des Brennelements 419 gewählt wurden. Ferner ist davon auszugehen, dass den Autoren des Berichts /SCK 05b/ die vollständige Version von /SCK 05a/ zur Verfügung stand und somit ggf. auch konkrete Angaben zu den Stäben aus Brennelement 419, so dass anzunehmen ist, dass dann diese Werte in /SCK 05b/ übertragen wurden. Sieht man von den angesprochenen offenen Fragen zur Zuordnung der angegebenen Daten ab, so sind die enthaltenden Angaben bzgl. Pellet- und Hüllrohrgeometrie in /SCK 05b/ und /SCK 05a/ konsistent. Zusätzlich zu den Daten in /SCK 05b/ sind in /SCK 05a/ noch die Dicke des Hüllrohr-Liners und das Dish-Volumen angegeben. Alle genannten Werte sind in Tab. 2.86 zusammengestellt.

Auch /SCK 04/ enthält einzelne Angaben zur Geometrie von Pellet und Hüllrohr, die der Referenz nach allerdings aus /SCK 05b/ stammen, womit die Daten aus beiden Berichten miteinander konsistent sind. Auf einen separaten Eintrag in Tab. 2.86 wurde daher verzichtet.

**Tab. 2.86** Geometrische Abmessungen des Brennelements 419 und dessen Brennstäbe nach /SCK 04/, /SCK 05b/, /SCK 05a/

Parameter	/SCK 05b/, /SCK 04/	/SCK 05a/
Pelletdurchmesser [cm]	0,805 ± 0,013	0,805 ± 0,013
Hüllrohrinnendurchmesser [cm]	0,822 ± 0,040	0,822 ± 0,040
Hüllrohraußendurchmesser [cm]	0,950 ± 0,050	0,950 ± 0,050
Dicke Hüllrohr-Liner [mm]	–	0,15 ± 0,05
Dish-Volumen [mm <sup>3</sup> ]	–	10 ± 3
Aktive Brennstoffhöhe [cm]	390	
Steuerstabführungsrohrinnendurchmesser [cm]	1,110	
Steuerstabführungsrohraußendurchmesser [cm]	1,232	
Brennstabmittenabstand [cm]	1,27	
Brennelementmittenabstand [cm]	23,116	

### Materialzusammensetzung

Brennstoffzusammensetzungen werden im Detail im Bericht /SCK 05a/ wiedergegeben, allerdings sind dort mehrere leicht unterschiedliche Zusammensetzungen enthalten und somit keine eindeutige Identifikation der hier relevanten Zusammensetzung gegeben. So wird im Kapitel 6 eine unbestrahlte Brennstoffzusammensetzung mit zwei Sätzen an Verunreinigungen wiedergegeben, d. h. es lagen hier vermutlich zwei Chargen von Brennstoffen mit kompatiblen Uranvektoren, aber unterschiedlichen Verunreinigungen vor. Im Kapitel 7 sind zwei unbestrahlte Brennstoffzusammensetzungen mit Verunreinigungen unter den Bezeichnungen „Lot 1“ und „Lot 12“ enthalten, welchen Brennstabpositionen H8 bis H11, K8 bis K11, L8 bis L11 und M8 bis M11 zugeordnet werden. Der Brennstabposition M11 wird dabei die Zusammensetzung „Lot 12“ zugeordnet, so dass hier entsprechend der obigen Diskussion zum Bericht /SCK 05a/ vermutlich die Zusammensetzung „Lot 12“ die Brennstabzusammensetzung des betrachteten Probenstabs M11 beschreibt. Alle drei Zusammensetzungen mit ihren Verunreinigungen sind nachfolgend in Tab. 2.87 und Tab. 2.88 wiedergegeben. Angaben zu den Gd-haltigen Brennstäben sind in /SCK 05a/ nicht enthalten.

Im Bericht /SCK 05b/ sind ebenfalls Angaben zur Brennstoffzusammensetzung zusammengestellt, welche hier in Tab. 2.89 wiedergegeben sind. Die Daten für die UO<sub>2</sub>-

Brennstäbe sind dabei vermutlich /SCK 05a/ entnommen<sup>12</sup>. Die <sup>235</sup>U-Anreicherung ist mit 3,8 wt.-% angegeben, sie wurde also offensichtlich gegenüber /SCK 05a/ gerundet. Anteile für <sup>234</sup>U und <sup>236</sup>U werden dagegen nicht genannt bzw. mit 0,00 wt.-% angegeben, was allerdings den Angaben in /SCK 05a/ widerspricht. Die Brennstoffdichte ist mit 10,40 g/cm<sup>3</sup> angegeben<sup>13</sup>. Wenn dieser Wert nicht auch als gerundet angenommen wird, würde er dafür sprechen, dass hier die Daten aus /SCK 05a/, Kap. 6 „U 3.8 w% GKN fresh fuel pins“ übernommen wurden. Dies würde dann allerdings der obigen Einschätzung widersprechen, dass vermutlich die Angaben in /SCK 05a/, Kap. 7 „U 3.8 w% GKN refabricated irradiated fuel pins“ die ursprüngliche Zusammensetzung der bestrahlten Brennstäbe des Brennelements 419 beschreiben. Im Gegensatz zu /SCK 05a/ enthält /SCK 05b/ aber auch Angaben zu den Gd-haltigen Brennstäben, allerdings ohne Werte für die Anteile von <sup>234</sup>U oder <sup>236</sup>U im Brennstoff anzugeben. Die Zusammensetzung des Gd-haltigen Brennstoffs aus /SCK 05b/ sind ebenfalls in Tab. 2.89 wiedergeben.

Ferner enthält auch /SCK 04/ Angaben zur Zusammensetzung des frischen Brennstoffs der regulären UO<sub>2</sub>-Brennstäbe und gibt als Quelle eine frühe Version des Berichts /SCK 05b/ an. Diese Daten sind ebenfalls in Tab. 2.89 zusammengestellt. Die Angaben der <sup>235</sup>U-Anreicherung von 3,80 wt.-% und der Brennstoffdichte von 10,4 g/cm<sup>3</sup> sowie die Vernachlässigung von <sup>234</sup>U und <sup>236</sup>U im frischen Brennstoff stimmen zwar mit den Angaben in /SCK 05b/ überein, widersprechen damit aber auch den Daten in /SCK 05a/ (s. o.). Angaben zu den Gd-haltigen Stäben macht /SCK 04/ nicht, wobei diese aber auch nicht gammaspektroskopisch untersucht wurden. Als einzige zusätzliche Information gegenüber den beiden zuvor genannten Berichten enthält /SCK 04/ noch die Angabe des „linearen spezifischen Gewicht“ des Pellets von 0,522 kg/m. Wird eine ideale Zylinderform mit den nominellen Pellet-Abmessungen unterstellt (Tab. 2.86), so folgt daraus eine Brennstoffdichte von 10,26 g/cm<sup>3</sup>, welche gegenüber dem oben genannten Wert geringer ausfällt. Berücksichtigt man dagegen evtl. Aussparungen an den Pellet-Stirnseiten mit einem Gesamtvolumen von etwa 10 mm<sup>3</sup>,

---

<sup>12</sup> Vergleiche hierzu die Diskussion im Abschnitt „Brennelement“ bzgl. der Referenzierung von /SCK 05a/ in /SCK 05b/.

<sup>13</sup> Die Einheit der Dichte wird zwar für die UO<sub>2</sub>-Brennstäbe mit „% TD“, also Prozent der theoretischen Dichte, angegeben, aus dem Zahlenwert von 10,40 ist aber zu vermuten, dass es sich dabei um einen Schreibfehler handelt und die korrekte Einheit „g/cm<sup>3</sup>“ ist, so wie bei den Gd-haltigen Stäbe auch.

wie in /SCK 05a/ bzw. Tab. 2.86 angegeben<sup>14</sup> und welche üblicherweise in die Berechnung eines linearen Gewichts eingehen, so ergibt sich stattdessen eine Brennstoffdichte von 10,46 g/cm<sup>3</sup>. Dieser Wert kommt der angegebenen Dichte sowie auch den Angaben in /SCK 05a/ deutlich näher, weshalb zu vermuten ist, dass die Pellets entsprechende Aussparungen aufweisen, womit die angegebenen Werte konsistent wären. Konkrete Angaben dazu sind in /SCK 04/ aber nicht enthalten.

**Tab. 2.87** Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung nach /SCK 05a/

Isotop / Element	Kap. 6		Kap. 7 „Lot 1“	Kap. 7 „Lot 12“
Brennstoffzusammensetzung [wt.-%]				
<sup>234</sup> U	0,036		0,0286	0,0306
<sup>235</sup> U	3,798 ± 0,001		3,8042	3,808
<sup>236</sup> U	0,000		0,0028	0,002
<sup>238</sup> U	96,166 ± 0,001		96,1644	96,1594
Verunreinigungen [µg/gU]				
Al	91,6	82,0	< 10	< 10
Ca	< 2	< 2	< 10	< 10
Fe	7,5	16,3	< 10	< 10
Ni	1,9	2,5	< 5	< 5
Si	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn	1,5	1,2	< 10	< 10
Gd	< 0,3	< 0,3	< 0,05	< 0,05
N	9,0	8,7	< 10	< 10
C	6,0	6,3	< 5	< 5
Cl	–	–	< 3	< 3
Fluoride	2,6	2,4	–	–
Chloride	< 5	< 5	–	–
H	< 0,1 µg/g <sub>UO2</sub>	< 0,1 µg/g <sub>UO2</sub>	3,1 mm <sup>3</sup> /g <sub>U</sub>	2,6 mm <sup>3</sup> /g <sub>U</sub>

<sup>14</sup> Vorbehaltlich der Tatsache, dass sich die Angaben in /SCK 05a/ nicht zwingend auf die Brennstäbe des Brennelements 419 beziehen, vergl. Abschnitt „Brennelement“.

**Tab. 2.88** Brennstoffdichte nach /SCK 05a/

Brennstoffdichte [g/cm <sup>3</sup> ]		
Kap. 6	Kap. 7 „Lot 1“	Kap. 7 „Lot 12“
10,40 ± 0,15	10,42	10,435

**Tab. 2.89** Brennstoffzusammensetzung nach /SCK 05b/

	Brennstab	
	UO <sub>2</sub> , /SCK 05b/, /SCK 04/	UO <sub>2</sub> - Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , /SCK 05b/
<sup>235</sup> U [wt.-%]	3,8	2,6
U/O	2,00	–
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [wt.-%]	–	7,0
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	10,40	10,13 ± 0,15
Lin. spez. Gewicht [g/cm]	5,22	–

Das Hüllrohrmaterial wird in /SCK 05a/ und /SCK 05b/ als „Duplex Zry-4/Zr0.8Sn“ angegeben. In /SCK 05a/ ist zusätzlich dessen Dichte mit 6,6 g/cm<sup>3</sup> und dessen Zusammensetzung aufgeführt, wobei diese Angaben dort sowohl in Kapitel 6 als auch Kapitel 7 in identischer Form enthalten sind, d. h. im Gegensatz zur Brennstoffzusammensetzung liegen in diesem Fall keine unterschiedlichen Angaben vor. Die Zusammensetzung ist nachfolgend in Tab. 2.90 wiedergegeben. In /SCK 05b/ wird anstelle der Dichte für das Hüllrohrmaterial ein lineares spezifisches Gewicht von 1,176 g/cm angegeben, was mit den gegebenen Radien einer Dichte von 6,602 g/cm<sup>3</sup> entspricht und damit konsistent mit /SCK 05a/ ist.

Dagegen wird in /SCK 04/ das Hüllrohrmaterial als Zircaloy-2 mit einer Dichte von 0,641 g/cm<sup>3</sup> angegeben, wobei aber gleichzeitig für diese Angaben eine frühere Version des Berichts /SCK 05b/ von 2002 als Quelle angegeben wird. An dieser Stelle ist allerdings nicht eindeutig zu entscheiden, ob eine der Angaben in /SCK 04/ bzw. /SCK 05b/ und /SCK 05a/ fehlerhaft ist. Allerdings ist der gängigen Praxis nach, Zircaloy-2 kein übliches Hüllrohrmaterial in DWR-Reaktoren. Ebenso erscheint es unrealistisch, dass sich die Hüllrohrmaterialien der originalen Brennstäbe des Brennelements 419 und der verkürzten Stäbe für die Messungen im VENUS-Reaktor unterscheiden, also dass neue Hüllrohre für die Herstellung der verkürzten Stäbe verwendet und die Pellets aus den ursprünglichen Hüllrohren in diese neuen Hüllrohre verbracht wur-

den<sup>15</sup>. Daher ist zu vermuten, dass es sich bei der Angabe in /SCK 04/ um einen Schreibfehler handeln dürfte.

**Tab. 2.90** Zusammensetzung des Hüllrohrs nach /SCK 05a/

Element	Zry-4 Grundmaterial [wt.-%]	Liner-Material [wt.-%]
Sn	1,4 – 1,6	0,7 – 0,9
Fe	0,18 – 0,24	0,24 – 0,32
Cr	0,07 – 0,13	0,13 – 0,21
Fe + Cr	0,28 – 0,37	Keine Angabe
O	0,12 – 0,16	0,12 – 0,16
Zr (+ Verunreinigungen)	Rest	Rest

### Bestrahlungsgeschichte

Die Bestrahlungsgeschichte ist im Bericht /SCK 05b/ dokumentiert. Bestrahlt wurde das Brennelement 419 in den vier Zyklen 5 bis 8 zwischen 1994 und 1997 (Tab. 2.91). Generell sind laut /SCK 05b/ detaillierte zeit- und orts aufgelöste Daten zur Bestrahlungsgeschichte, insbesondere zur Leistung und Abbrand, des Brennelements 419 vorhanden, allerdings liegen diese in separaten Dateien vor, die augenscheinlich bislang nicht frei verfügbar sind. In /SCK 05b/ sind von diesen detaillierten Daten lediglich Auszüge enthalten. Stattdessen gibt /SCK 05b/ die über die mittleren zwei Meter Länge der zentralen 16 Brennstäbe gemittelten Leistungs- und Abbrandwerte in 54 Zeitschritten an. In den gleichen Zeitschritten werden Brennstoff- und Moderatortemperaturen sowie Borgehalt angegeben. Inwiefern insbesondere die angegebenen Temperatur ebenfalls über die mittleren zwei Meter Länge der zentralen 16 Brennstäbe gemittelt wurde geht aus /SCK 05b/ nicht eindeutig hervor, es ist aber zu vermuten, dass dies der Fall ist. Die gegebenen Werte sind in Tab. 2.92 wiedergeben

Neben der Mittelung der Bestrahlungsgeschichte über die zentralen 16 Brennstäbe wurden Leistung und Abbrand zudem ausgehend von einer nicht weiter spezifizierten feineren zeitlichen Darstellung in die bereits erwähnten 54 Zeitschritte kondensiert, in welchen die Daten für Temperaturen und Borkonzentration vorlagen /SCK 05b/. Es erscheint daher plausible, dass Leistung und Abbrand dann in Form des zeitlichen Mit-

---

<sup>15</sup> Private Kommunikation mit H.-G. Sonnenburg, F. Boldt, GRS.

telwerts je Zeitschritt angegeben wurden. Ob dies tatsächlich zutrifft und in welcher Form Temperaturen und Borkonzentration angegeben sind (Mittelwert über Zeitschritt oder Werte zum Zeitpunkt), wird in /SCK 05b/ allerdings nicht explizit erwähnt.

Es ist zu beachten, dass in Tab. 2.91 die Summe der angegebenen Zeitschrittlängen geringfügig von der Anzahl der Tage zwischen gegebenem Zyklusbeginn und -ende abweicht. Die Zeitschrittlängen sind also offensichtlich in Form von sog. „effective (full) power days“ zu interpretieren (Tab. 2.91).

**Tab. 2.91** Bestrahlungszeitraum des Brennelements 419 nach /SCK 05b/

Zyklus	Zyklusbeginn	Zyklusende	Zyklusdauer Datum <sup>1</sup> [d]	Zyklusdauer Tab. 2.92 <sup>2</sup> [d]	Revision Datum <sup>3</sup> [d]
5	24.08.1993	01.07.1994	311	310,0	22
6	23.07.1994	18.08.1995	391	386,7	17
7	04.09.1995	17.08.1996	348	347,9	15
8	01.09.1996	16.08.1997	349	346,8	

<sup>1</sup> Zykluslänge entsprechend des Beginn- und Enddatums, die Tage von Zyklusbeginn und -ende werden jeweils zur Hälfte der Zyklusdauer und der Revision zugeordnet. Diese Werte sind nachträglich berechnet und so nicht in /SCK 05b/ enthalten.

<sup>2</sup> Aus den Bestrahlungsdaten nach Tab. 2.92 errechnete Zyklusdauer.

<sup>3</sup> Länge der Revisionen entsprechend des Zyklusendes und -beginns.

Neben der Moderatortemperatur wird auch die Moderatordichte je Zeitschritt angegeben. Der Vergleich der gegebenen Dichten mit den Werten der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) /INT 07/ unter Verwendung des nominellen Kühlmitteldrucks von 158 bar und der gegebenen Moderatortemperaturen zeigt, dass die in /SCK 05b/ gegebenen Dichten geringfügig, aber doch systematisch unter den Werten der IAPWS liegen. Im Zyklus 5 mit den dort höheren Kühlmitteltemperaturen liegt die Differenz zu den IAPWS-Werten um  $0,0014 \text{ g/cm}^3$ , im Zyklus 8 mit den geringeren Kühlmitteltemperaturen liegt die Differenz lediglich um  $0,0003 \text{ g/cm}^3$ . Nähere Angaben zur Bestimmung der Dichten werden in /SCK 05b/ nicht gemacht, vermutlich wurden sie aber aus den ermittelten Moderatortemperaturen abgeleitet und für diese Ableitung eine andere bzw. ältere Parametrisierung der Wasserzustandsgrößen als die hier berücksichtigte Parametrisierung der IAPWS verwendet. Damit wären die Temperaturen die eigentlich für die Nachrechnung zu berücksichtigend Größe. Ebenso werden keine weiteren Informationen zu den angegebenen Brennstofftemperaturen gegeben. Es ist aber zu vermuten, dass es sich hierbei um effektive Brennstofftemperaturen handelt.

Zudem wird in /SCK 05b/ die im Brennstoff erzeugte Leistung sowohl in W/cm als auch in W/g<sub>HM</sub> angegeben. Das Umrechnen der in W/cm gegebenen Leistungswerte in W/g<sub>HM</sub> unter Annahme einer zylindrischen Pelletgeometrie und der in /SCK 05a/ gegebenen Brennstoffdichte von 10,435 g/cm<sup>3</sup> (entspricht einer Uranpartialdichte von 9,20 g/cm<sup>3</sup>) führt allerdings zu Werten, die systematisch um etwa 2 % unter den in W/g<sub>HM</sub> angegebenen Leistungswerten liegen. Werden dagegen zusätzlich evtl. Aussparungen an den Pelletstirnseiten mit einem Gesamtvolumen von etwa 10 mm<sup>3</sup>, wie in /SCK 05a/ bzw. Tab. 2.86 angegeben<sup>16</sup>, berücksichtigt, so ergeben sich damit Leistungswerte in W/g<sub>HM</sub>, die nur noch 0,3 % unter den entsprechenden angegebenen Werten liegen. Die Annahme entsprechender Aussparungen können also die vermeintliche Diskrepanz zwischen den beiden angegebenen Leistungswerten erklären, wie dies auch bereits schon bei der Angabe des „linearen spezifischen Gewicht“ in /SCK 04/ zu beobachten war, vgl. Abschnitt „Materialzusammensetzung“. Angaben zu einer solchen Aussparung sind in /SCK 05b/ aber nicht enthalten. Zudem sind die in W/g angegebenen Leistungswerte sehr gut mit den gegebenen Abbrandwerten konsistent, d. h. die aus diesen Leistungswerten errechneten Abbrandwerte sind bis auf Rundungseffekte mit den gegebenen Abbrandwerten identisch. Dies lässt den Schluss zu, dass hier offensichtlich die mittleren Leistungen je Zeitschritt angegeben sind.

Zusätzlich gibt auch /SCK 04/ eine grafische Darstellung des Leistungsverlaufs des Stabs M11 im Brennelement 419 wieder. Als Quelle für diese Daten wird eine ältere Version des Berichts /SCK 05b/ angegeben. Die aus dieser Darstellung zu entnehmenden Leistungswerte in W/cm sind um rund 10 % geringer als die entsprechenden in /SCK 05b/ bzw. Tab. 2.92 angegebenen Werte. Allerdings scheinen sich die Leistungsverläufe in beiden Berichten dem optischen Vergleich nicht nur um einen konstanten Faktor zu unterscheiden, sondern zeigen in ihrem zeitlichen Verlauf einen zusätzlichen Unterschied in der Größenordnung von einigen Prozent, ggf. bis zu etwa 10 %. Eine genauere Auswertung ist aufgrund der begrenzten Skala der Abbildung in /SCK 04/ nicht möglich. Ein konstanter Faktor wäre durch die Leistungsnormierung in der Nachrechnung unproblematisch, zusätzliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf werden so aber nicht korrigiert. Da die Werte in /SCK 05b/ bzw. Tab. 2.92 die Mittelung über die zentralen 16 Stäbe wiedergeben, spricht der Unterschied zu den Werten in /SCK 04/ dafür, dass sich die Leistung der zentralen 16 Stäbe in ihrem zeitlichen Ver-

---

<sup>16</sup> Vorbehaltlich der Tatsache, dass sich die Angaben in /SCK 05a/ nicht zwingend auf die Brennstäbe des Brennelements 419 beziehen, vgl. Abschnitt „Brennelement“.

lauf nicht nur um einen konstanten Faktor sondern zusätzlich auch in der Form des Verlaufs um einige Prozent, ggf. bis zu mehr als 10 % voneinander unterscheiden. Die Darstellung in /SCK 04/ ist allerdings zu klein, als dass aus ihr hinreichend genaue Werte für eine Probennachrechnung abgelesen werden könnten.

**Tab. 2.92** Gemittelte Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 5 bis 8 des Brennelements 419 aus GKN-II /SCK 05b/

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Moderatortemperatur [K]	Brennstofftemperatur [K]	Leistung [W/gHM]	Akkumulierter Abbrand [GWd/tHM]
5	6,0	965,6	592,7	1030,4	61,92	0,37
	24,0	876,6	592,6	1029,4	60,87	1,83
	30,0	783,2	592,5	1028,5	59,76	3,63
	30,0	681,8	593,0	1030,9	58,61	5,38
	30,0	583,2	593,4	1030,2	58,21	7,13
	30,0	489,4	593,7	1028,6	57,90	8,87
	30,0	400,9	594,2	1027,4	57,75	10,60
	30,0	308,3	594,3	1021,4	57,36	12,32
	30,0	206,9	593,9	1008,1	56,15	14,00
	30,0	99,4	593,7	993,7	54,89	15,65
	25,4	10,0	593,4	981,8	53,93	17,02
	14,6	10,0	587,5	957,8	51,41	17,77
Revision	22,0				0,00	17,77
6	6,0	1175,9	590,0	964,0	51,58	18,08
	24,0	1088,9	589,9	952,7	51,02	19,31
	30,0	998,8	589,6	937,7	49,98	20,80
	30,0	898,8	589,8	926,1	48,93	22,27
	30,0	800,2	589,9	917,1	48,58	23,73
	30,0	706,1	590,0	909,5	48,33	25,18
	30,0	617,3	590,1	902,7	48,17	26,63
	30,0	529,3	590,1	894,6	47,87	28,06
	30,0	432,0	589,7	883,5	46,89	29,47
	30,0	323,7	589,2	872,7	45,76	30,84
	30,0	212,4	589,0	863,5	44,73	32,18
	30,0	101,8	588,8	855,4	44,11	33,51
	25,0	10,0	588,9	849,4	43,75	34,60
	31,7	10,0	575,2	802,0	40,41	35,88
Revision	17,0				0,00	35,88

Zyklus	Zeitschritt [d]	Borkonzentration [ppm]	Moderatortemperatur [K]	Brennstofftemperatur [K]	Leistung [W/gHM]	Akkumulierter Abbrand [GWd/tHM]
7	6,0	1016,0	585,9	832,5	41,17	36,13
	24,0	926,5	585,8	828,5	40,96	37,11
	30,0	833,8	585,7	823,4	40,52	38,33
	30,0	732,3	585,9	820,2	40,31	39,54
	30,0	632,7	586,2	818,6	40,44	40,75
	30,0	537,4	586,4	817,4	40,66	41,97
	30,0	447,5	586,8	816,7	40,93	43,20
	30,0	355,7	586,6	812,6	40,71	44,42
	30,0	255,0	586,2	805,4	39,87	45,61
	30,0	148,6	585,8	799,2	38,90	46,78
	38,9	7,8	585,9	793,3	38,47	48,28
	39,0	7,8	568,8	738,1	34,55	49,63
	Revision	15,0				0,00
8	6,0	1228,9	570,8	634,6	11,32	49,69
	24,0	1119,9	571,0	635,7	11,47	49,97
	30,0	1001,3	571,2	636,4	11,58	50,32
	30,0	874,3	571,4	637,4	11,79	50,67
	30,0	749,2	571,7	638,6	12,02	51,03
	30,0	627,3	571,9	640,0	12,31	51,40
	30,0	509,1	572,1	641,6	12,64	51,78
	30,0	395,4	572,4	643,4	13,00	52,17
	30,0	282,6	572,6	644,9	13,24	52,57
	30,0	169,4	572,7	646,2	13,52	52,97
	42,4	11,9	573,2	648,0	13,82	53,56
	34,4	11,9	560,2	626,7	12,86	54,00

### Experimentelle Messergebnisse

Die Messungen der Nuklidkonzentrationen im bestrahlten Brennstoff und die dabei erzielten Resultate sind in /SCK 06/ zusammengefasst. Experimentell untersucht wurden insgesamt 17 Nuklide der Actiniden Uran, Plutonium, Americium, Neptunium und Curium, zudem insgesamt 8 Nuklide der Abbrandindikatoren Neodym, Cäsium und Cer sowie die sog. TOP 19 der stark neutronenabsorbierenden Spaltprodukte. Neben den chemischen Verfahren zur Auflösung des Brennstoffs und der Trennung der verschiedenen Elemente erfolgte die Messung der Nuklidkonzentrationen mittels  $\alpha$ -Spektrometrie ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ),  $\gamma$ -Spektrometrie ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{243}\text{Cm}$ ),

Thermische Ionisations-Massenspektrometrie (TIMS) ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242(m)}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{145}\text{Nd}$ ,  $^{146}\text{Nd}$ ,  $^{148}\text{Nd}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{150}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ )<sup>17</sup> und Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{109}\text{Ag}$ ,  $^{105}\text{Pd}$ ,  $^{108}\text{Pd}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{101}\text{Ru}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ). Für die Nuklide  $^{142}\text{Nd}$ ,  $^{148}\text{Sm}$  und  $^{155}\text{Eu}$  enthält /SCK 06/ keine expliziten Angaben zur verwendeten Messmethode, vermutlich ist das Fehlen dieser Nuklide in den Auslistungen übersehen worden. Aus dem jeweils angegebenen Messdatum lässt sich allerdings mutmaßen, dass  $^{142}\text{Nd}$  zusammen mit den übrigen Neodym-Nukliden,  $^{148}\text{Sm}$  zusammen mit übrigen Samarium-Nukliden und  $^{155}\text{Eu}$  zusammen mit  $^{154}\text{Eu}$  gemessen wurden. Damit ist anzunehmen, dass  $^{142}\text{Nd}$  und  $^{148}\text{Sm}$  mittels ICP-MS sowie  $^{155}\text{Eu}$  mittels  $\gamma$ -Spektrometrie gemessen worden sind.

Die gemessenen Nuklidkonzentrationen sind als Massenverhältnisse von Nuklid zu bestrahltem Brennstoff oder Nuklid zu  $^{238}\text{U}$  im bestrahlten Brennstoff zum Messzeitpunkt sowie zu einem einheitlichen Bezugsdatum angegeben /SCK 06/. Zusätzlich sind dazu absolute bzw. relative Unsicherheiten abgeschätzt worden, die als 95%-Konfidenzintervall angegeben sind. Zusammengefasst sind die Resultate zum Messzeitpunkt in Tab. 2.93 zusammen mit dem jeweiligen Datum der Messung. Für einzelne Nuklide wird die gemessene Konzentration nicht nur durch das Datum der Messung, sondern auch durch das Datum ihrer chemischen Separation beeinflusst, weil sie z. B. ab diesem Datum in der abseparierten Probe nicht mehr durch Zerfall ihrer Mutternuklide nachgebildet werden. Aus diesem Grund sind in /SCK 06/ auch die Daten für einige Separationsschritte angegeben, welche in Tab. 2.94 zusammengefasst sind.

---

<sup>17</sup> In der Massenspektrometrie kann grundsätzlich nicht zwischen Grundzustand und metastabilem Zustand eines Nuklids unterschieden werden, d. h. hier ist durch die Massenspektrometrie selbst keine Unterscheidung zwischen  $^{242}\text{Am}$  und  $^{242m}\text{Am}$  möglich. Aufgrund der deutlich kürzeren Halbwertszeit von  $^{242}\text{Am}$  ist hier aber davon auszugehen, dass praktisch nur noch  $^{242m}\text{Am}$  gemessen wurde.

**Tab. 2.93** Gemessene Nuklid-Massenverhältnisse zum jeweiligen Zeitpunkt der Messung /SCK 06/

Die Angaben beziehen sich auf die Gesamtmasse des bestrahlten Brennstoffs bzw. den Massenanteil von  $^{238}\text{U}$  im bestrahlten Brennstoff. Die angegebenen Unsicherheiten entsprechen einem 95%-Konfidenzintervall ( $2\sigma$ ).

Nuklid	Datum Messung	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>238U</sub>
$^{234}\text{U}$	09.12.2004	$0,129 \pm 0,006_{2\sigma}$	$0,162 \pm 0,008_{2\sigma}$
$^{235}\text{U}$	09.12.2004	$4,43 \pm 0,03_{2\sigma}$	$5,56 \pm 0,04_{2\sigma}$
$^{236}\text{U}$	09.12.2004	$4,63 \pm 0,03_{2\sigma}$	$5,81 \pm 0,04_{2\sigma}$
$^{238}\text{U}$	09.12.2004	$797 \pm 4_{2\sigma}$	$1000 \pm 6_{2\sigma}$
$^{237}\text{Np}$	29.04.2005	$0,52 \pm 0,10_{2\sigma}$	$0,66 \pm 0,13_{2\sigma}$
$^{238}\text{Pu}$	02.11.2004	$0,371 \pm 0,011_{2\sigma}$	$0,465 \pm 0,014_{2\sigma}$
$^{239}\text{Pu}$	02.11.2004	$4,988 \pm 0,030_{2\sigma}$	$6,26 \pm 0,04_{2\sigma}$
$^{240}\text{Pu}$	02.11.2004	$2,777 \pm 0,014_{2\sigma}$	$3,49 \pm 0,02_{2\sigma}$
$^{241}\text{Pu}$	02.11.2004	$1,121 \pm 0,006_{2\sigma}$	$1,407 \pm 0,008_{2\sigma}$
$^{242}\text{Pu}$	02.11.2004	$1,013 \pm 0,005_{2\sigma}$	$1,271 \pm 0,008_{2\sigma}$
$^{241}\text{Am}$	07.03.2005	$0,457 \pm 0,016_{2\sigma}$	$0,57 \pm 0,02_{2\sigma}$
$^{242(m)}\text{Am}$	07.03.2005	$0,00135 \pm 0,00014_{2\sigma}$	$0,00170 \pm 0,00018_{2\sigma}$
$^{243}\text{Am}$	07.03.2005	$0,215 \pm 0,007_{2\sigma}$	$0,270 \pm 0,009_{2\sigma}$
$^{242}\text{Cm}$	29.09.2004	$3,7\text{E-}06 \pm 1,2\text{E-}06_{2\sigma}$	$4,7\text{E-}06 \pm 1,5\text{E-}06_{2\sigma}$
$^{243}\text{Cm}$	07.03.2005	$6,7\text{E-}04 \pm 1,4\text{E-}04_{2\sigma}$	$8,4\text{E-}04 \pm 1,7\text{E-}04_{2\sigma}$
$^{244}\text{Cm}$	29.09.2004	$0,115 \pm 0,003_{2\sigma}$	$0,144 \pm 0,004_{2\sigma}$
$^{245}\text{Cm}$	01.06.2005	$0,0115 \pm 0,0006_{2\sigma}$	$0,0144 \pm 0,0008_{2\sigma}$
$^{144}\text{Ce}$	28.09.2004	$4,2\text{E-}04 \pm 0,4\text{E-}04_{2\sigma}$	$5,3\text{E-}04 \pm 0,5\text{E-}04_{2\sigma}$
$^{142}\text{Nd}$	28.02.2005	$0,0451 \pm 0,0003_{2\sigma}$	$0,0566 \pm 0,0004_{2\sigma}$
$^{143}\text{Nd}$	28.02.2005	$0,926 \pm 0,005_{2\sigma}$	$1,162 \pm 0,007_{2\sigma}$
$^{144}\text{Nd}$	28.02.2005	$1,951 \pm 0,011_{2\sigma}$	$2,449 \pm 0,016_{2\sigma}$
$^{145}\text{Nd}$	28.02.2005	$0,861 \pm 0,005_{2\sigma}$	$1,081 \pm 0,007_{2\sigma}$
$^{146}\text{Nd}$	28.02.2005	$1,016 \pm 0,006_{2\sigma}$	$1,276 \pm 0,008_{2\sigma}$
$^{148}\text{Nd}$	28.02.2005	$0,515 \pm 0,003_{2\sigma}$	$0,647 \pm 0,004_{2\sigma}$
$^{150}\text{Nd}$	28.02.2005	$0,2551 \pm 0,0015_{2\sigma}$	$0,320 \pm 0,002_{2\sigma}$
$^{147}\text{Sm}$	10.02.2005	$0,2578 \pm 0,0018_{2\sigma}$	$0,324 \pm 0,002_{2\sigma}$
$^{148}\text{Sm}$	10.02.2005	$0,2492 \pm 0,0018_{2\sigma}$	$0,313 \pm 0,002_{2\sigma}$
$^{149}\text{Sm}$	10.02.2005	$0,00206 \pm 0,00004_{2\sigma}$	$0,00259 \pm 0,00006_{2\sigma}$
$^{150}\text{Sm}$	10.02.2005	$0,413 \pm 0,003_{2\sigma}$	$0,518 \pm 0,004_{2\sigma}$
$^{151}\text{Sm}$	10.02.2005	$0,01236 \pm 0,00010_{2\sigma}$	$0,01551 \pm 0,00014_{2\sigma}$

Nuklid	Datum Messung	mg/g <sub>fuel</sub>	mg/g <sub>238U</sub>
<sup>152</sup> Sm	10.02.2005	0,1273 ± 0,0009 <sub>2σ</sub>	0,1598 ± 0,0012 <sub>2σ</sub>
<sup>154</sup> Sm	10.02.2005	0,0579 ± 0,0004 <sub>2σ</sub>	0,0727 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>
<sup>153</sup> Eu	10.02.2005	0,1661 ± 0,0014 <sub>2σ</sub>	0,2086 ± 0,0019 <sub>2σ</sub>
<sup>154</sup> Eu	28.09.2004	0,0199 ± 0,0007 <sub>2σ</sub>	0,0250 ± 0,0009 <sub>2σ</sub>
<sup>155</sup> Eu	28.09.2004	0,0053 ± 0,0003 <sub>2σ</sub>	0,0067 ± 0,0004 <sub>2σ</sub>
<sup>155</sup> Gd	10.02.2005	0,0088 ± 0,0004 <sub>2σ</sub>	0,0110 ± 0,0006 <sub>2σ</sub>
<sup>133</sup> Cs	15.11.2004	1,39 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	1,74 ± 0,05 <sub>2σ</sub>
<sup>135</sup> Cs	15.11.2004	0,498 ± 0,013 <sub>2σ</sub>	0,625 ± 0,016 <sub>2σ</sub>
<sup>137</sup> Cs	28.09.2004	1,45 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	1,82 ± 0,05 <sub>2σ</sub>
<sup>95</sup> Mo	29.04.2005	0,90 ± 0,09 <sub>2σ</sub>	1,13 ± 0,11 <sub>2σ</sub>
<sup>99</sup> Tc	29.04.2005	1,08 ± 0,11 <sub>2σ</sub>	1,36 ± 0,14 <sub>2σ</sub>
<sup>101</sup> Ru	29.04.2005	0,84 ± 0,08 <sub>2σ</sub>	1,05 ± 0,10 <sub>2σ</sub>
<sup>103</sup> Rh	29.04.2005	0,51 ± 0,05 <sub>2σ</sub>	0,63 ± 0,06 <sub>2σ</sub>
<sup>105</sup> Pd	29.04.2005	0,39 ± 0,04 <sub>2σ</sub>	0,49 ± 0,05 <sub>2σ</sub>
<sup>108</sup> Pd	29.04.2005	0,153 ± 0,015 <sub>2σ</sub>	0,192 ± 0,019 <sub>2σ</sub>
<sup>109</sup> Ag	29.04.2005	0,092 ± 0,009 <sub>2σ</sub>	0,116 ± 0,012 <sub>2σ</sub>

**Tab. 2.94** Daten der chemischen Separation verschiedener Elemente /SCK 06/

Separierte Elemente	Datum der chemischen Separation
Am / Pu	21.10.2004
Nd / Ce	21.10.2004
Sm / Pm	28.10.2004
Gd / Eu	28.10.2004

## 2.6.2 Modellierung

Aus den in Kap. 2.6.1 beschriebenen Daten wurde ein geeignetes Rechenmodell erstellt, welches im Folgenden beschrieben wird.

### Allgemeine Parameter

Für alle durchgeführten Nachrechnungen mit MOTIVE sind einheitliche allgemeine Parameter, wie Neutronentransport- und Inventarcode, Wirkungsquerschnittsbibliothek, Predictor-Corrector-Methode, etc. gewählt worden. Diese Werte sind in Tab. 2.13 zusammengestellt. Zudem ist eine Liste mit Nukliden anzugeben, für welche die errech-

neten Konzentrationen auszugeben sind. Hier wurden die Nuklide gewählt, für welche Messdaten vorliegen (vgl. Tab. 2.93).

### **Modellgeometrie**

Die verwendete Modellgeometrie besteht in erster Linie aus einem unendlichen Gitter annähernd identischer Brennelemente, welches mithilfe eines einzelnen Brennelements mit reflektierenden Randbedingungen gebildet wurde. Dieses Modell ist dabei auf zwei Dimensionen beschränkt, d. h. in axialer Brennstabrichtung wurde das Modell nicht weiter unterteilt und ebenfalls durch reflektierende Randbedingungen abgeschlossen. Das Brennelement wurde gemäß Abb. 2.42 modelliert, wobei dieses Brennelement keine 1/8-Spiegelsymmetrie, sondern aufgrund der Gd-haltigen Stäbe auf den Positionen L4, D9, S10 und K15 eine 90°-Rotationssymmetrie aufweist. Zwar würde die Brennelementsymmetrie periodische Randbedingungen erfordern, um tatsächlich identische Brennelemente zu modellieren, diese Möglichkeit besteht in MOTIVE allerdings noch nicht, so dass hier auf reflektierende Randbedingungen zurückgegriffen wurde, wodurch das modellierte Brennelementgitter genaugenommen aus abwechselnd gespiegelten Brennelementen besteht.

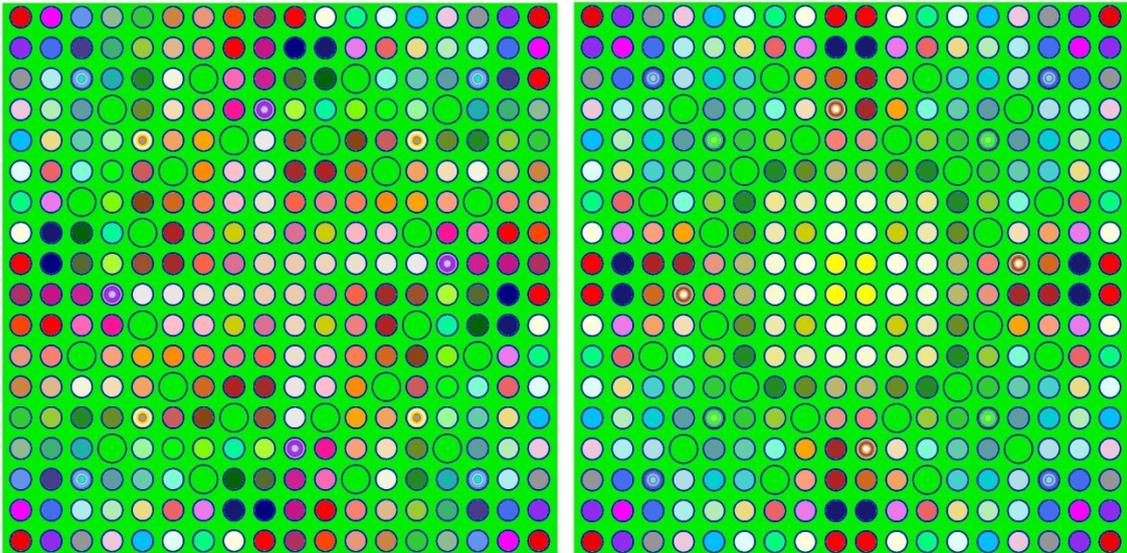
Die einzelnen Stäbe im Brennelement wurden separat modelliert, also durch eigene abzubrennende Materialien im Rechenmodell beschrieben, wobei Stäbe auf homologen Positionen zusammengefasst wurden. Auf diese Weise wurde ein detailliertes Rechenmodell unter Berücksichtigung der Rotationssymmetrie mit 75 separat betrachteten Brennstäben erstellt. Aufgrund der großen Anzahl an unterschiedenen Stäben wurde zusätzlich ein zweites Rechenmodell mit einer vereinfachten Modellgeometrie entwickelt. In dieser vereinfachten Variante wurden die Stäbe mehrheitlich entsprechend der näherungsweise vorhandenen 1/8-Spiegelsymmetrie und lediglich die Stäbe auf und um den Positionen L4, D9, S10 und K15 entsprechend der eigentlichen Rotationssymmetrie modelliert, wodurch nur 36 Stäbe separat zu betrachten sind. Die sich für beide Varianten ergebenden Brennstabbelegungen in den jeweiligen Rechenmodellen sind in Abb. 2.43 für die detaillierte Variante und in Abb. 2.44 für die vereinfachte Variante dargestellt. Dabei gibt jeweils die Zahl 1 den Probenstab, die Zahlen 11 bis 45 bzw. 84 die übrigen Brennstäbe bzw. die abzubrennenden Materialien und die Zahl 100 die Steuerstabführungsrohre wieder. Die Umsetzung dieser Rechenmodelle in KENO-VI-Geometriemodelle zeigt Abb. 2.45.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	76	69	61	53	45	37	29	20	11
20	21	22	23	24	25	26	27	28	77	70	62	54	46	38	30	21	12
29	30	31	32	33	34	100	35	36	78	71	100	55	47	39	31	22	13
37	38	39	100	40	41	42	43	44	79	72	63	56	48	100	32	23	14
45	46	47	48	49	50	51	100	52	80	100	64	57	49	40	33	24	15
53	54	55	56	57	100	58	59	60	81	73	65	100	50	41	34	25	16
61	62	100	63	64	65	66	67	68	82	74	66	58	51	42	100	26	17
69	70	71	72	100	73	74	1	75	83	1	67	59	100	43	35	27	18
76	77	78	79	80	81	82	83	84	84	75	68	60	52	44	36	28	19
19	28	36	44	52	60	68	75	84	84	83	82	81	80	79	78	77	76
18	27	35	43	100	59	67	1	83	75	1	74	73	100	72	71	70	69
17	26	100	42	51	58	66	74	82	68	67	66	65	64	63	100	62	61
16	25	34	41	50	100	65	73	81	60	59	58	100	57	56	55	54	53
15	24	33	40	49	57	64	100	80	52	100	51	50	49	48	47	46	45
14	23	32	100	48	56	63	72	79	44	43	42	41	40	100	39	38	37
13	22	31	39	47	55	100	71	78	36	35	100	34	33	32	31	30	19
12	21	30	38	46	54	62	70	77	28	27	26	25	24	23	22	21	20
11	20	29	37	45	53	61	69	76	19	18	17	16	15	14	13	12	11

**Abb. 2.43** Brennstabbelegung im detaillierten Rechenmodell für das Brennelement 419 aus GKN-II

11	12	13	14	15	16	17	18	19	19	18	17	16	15	14	13	12	11
12	20	21	22	23	24	25	26	27	27	26	25	24	23	22	21	20	12
13	21	28	29	30	31	100	58	54	53	52	100	31	30	29	28	2	13
14	22	29	100	32	33	34	59	55	50	51	34	33	32	100	29	22	14
15	23	30	32	35	36	37	100	56	57	100	37	36	35	32	30	23	15
16	24	31	33	36	100	38	39	40	40	39	38	100	36	33	31	24	16
17	25	100	34	37	38	41	42	43	43	42	41	38	37	34	100	25	17
18	26	52	51	100	39	42	1	44	44	1	42	39	100	59	58	26	18
19	27	53	50	57	40	43	44	45	45	44	43	40	56	55	54	27	19
19	27	54	55	56	40	43	44	45	45	44	43	40	57	50	53	27	19
18	26	58	59	100	39	42	1	44	44	1	42	39	100	51	52	26	18
17	25	100	34	37	38	41	42	43	43	42	41	38	37	34	100	25	17
16	24	31	33	36	100	38	39	40	40	39	38	100	36	33	31	24	16
15	23	30	32	35	36	37	100	57	56	100	37	36	35	32	30	23	15
14	22	29	100	32	33	34	51	50	55	59	34	33	32	100	29	22	14
13	21	28	29	30	31	100	52	53	54	58	100	31	30	29	28	21	13
12	20	21	22	23	24	25	26	27	27	26	25	24	23	22	21	20	12
11	12	13	14	15	16	17	18	19	19	18	17	16	15	14	13	12	11

**Abb. 2.44** Brennstabbelegung im vereinfachten Rechenmodell für das Brennelement 419 aus GKN-II



**Abb. 2.45** Schematische Darstellung der KENO-VI-Geometriemodelle für das detaillierte (links) und vereinfachte (rechts) Rechenmodell für das Brennelement 419 aus GKN-II

Die geometrischen Abmessungen bzw. Abstände der Brennstäbe, Steuerstabführungsrohre und des Brennelements selbst sind entsprechend Tab. 2.86 modelliert worden. Diese Angaben sind in allen Berichten konsistent und es ist letztlich davon auszugehen, dass sie das Brennelement korrekt beschreiben (vgl. Kap. 2.6.1, Abschnitt „Brennelement“). Der Zwischenraum („Gap“) zwischen Pellet und Hüllrohr wurde hier mit modelliert, d. h. auf eine Berücksichtigung des Anschwellens der Pellets während des Abbrands („Swelling“) wurde verzichtet.

### Materialzusammensetzung

Die Brennstoffzusammensetzungen wurden entsprechend den Angaben in /SCK 05a/ und /SCK 05b/ modelliert. Dabei wurde für die  $\text{UO}_2$ -Brennstäbe die Beschreibung „LOT 12“ in /SCK 05a/, Kap. 7 herangezogen, welche hier als die augenscheinlich zutreffende Zusammensetzung angesehen wird, d. h. es wurden die entsprechende Zusammensetzung und Dichte aus Tab. 2.87 bzw. Tab. 2.88 übernommen (Kap. 2.6.1, Abschnitt „Materialzusammensetzung“). Für die Gd-haltigen Brennstäbe wurde die einzige verfügbare Beschreibung aus /SCK 05b/ genutzt, s. Tab. 2.89. Da letztere keine Angaben zu den Anteilen von  $^{234}\text{U}$  bzw.  $^{236}\text{U}$  macht, wurde für den  $^{234}\text{U}$ -Anteil das 0,0089-fachen der  $^{235}\text{U}$ -Anreicherung und kein  $^{236}\text{U}$  angenommen. Eventuelle Aussparungen an den Pelletstirnseiten (dishing) wurden hier vernachlässigt, d. h. die angegebenen Dichten wurden ohne Korrektur übernommen. Aus den angegebenen gewichts-

anteiligen Zusammensetzungen wurden die Kernzahldichten errechnet, wobei dazu für Sauerstoff das mittlere Atomgewicht entsprechend der natürlichen Isotopenzusammensetzung genutzt wurde. Im Rechenmodell wurde zur Vereinfachung der Sauerstoff als 100 %  $^{16}\text{O}$  modelliert. Die verwendeten Zusammensetzungen sind im Einzelnen in Tab. 2.95 aufgeführt.

Für das Hüllrohrmaterial wurde vereinfachend Zircaloy-4 angenommen, womit im Wesentlichen den Angaben in /SCK 05a/ und /SCK 05b/ gefolgt wurde, welche als die augenscheinlich korrekten Angaben angesehen werden. Die konkrete Zusammensetzung des Zircaloy-4 wurde der SCALE Standard Composition Library /PET 16/ entnommen, welche für die Dichte einen Wert von  $6,56 \text{ g/cm}^3$  angibt. Diese Dichte wurde hier übernommen und ist damit gerundet mit der Dichteangabe in /SCK 05a/ konform. Die konkrete verwendete Zusammensetzung ist in Tab. 2.65 (Kap. 2.4.2, Abschnitt „Materialzusammensetzung“) zusammengefasst, und entspricht im Wesentlichen den in Tab. 2.90 angegebenen Bandbreiten. Im Unterschied zu Tab. 2.90 berücksichtigt die SCALE Standard Composition Library für Zircaloy-4 allerdings zusätzlich eine Verunreinigung von 0,01 wt.-% Hafnium, vernachlässigt aber einen möglichen Anteil an Sauerstoff. Zusätzlich wird hier der in /SCK 05a/ und /SCK 05b/ angegebene Liner des Hüllrohrs vernachlässigt.

In Ermangelung entsprechender Informationen wurde angenommen, dass das Hüllrohr mit 30 bar Helium beaufschlagt wurde. Dementsprechend wurde im Rechenmodell Helium mit einer Kernzahldichte von  $7,4122\text{E-}04$  als Material im Zwischenraum zwischen Pellet und Hüllrohr („Gap“) eingesetzt. Für die Berechnung der Kernzahldichte wurde die natürliche Isotopenzusammensetzung des Heliums mit dem daraus resultierenden mittleren Atomgewicht genutzt, im Rechenmodell wurde aber zur Vereinfachung das Helium als reines  $^4\text{He}$  mit der genannten Kernzahldichte angenommen.

**Tab. 2.95** Verwendete nuklidweise Zusammensetzung des Brennstoffs für das Brennelement 419 aus GKN-II nach /SCK 05a/ und /SCK 05b/

UO <sub>2</sub> -Brennstab						
Bestandteil	Zusammensetzung [wt.-%]	Element <sup>1</sup> / Isotop	Mittlere Atommasse [u]	Anteil im Element		Kernzahl-dichte <sup>2</sup> [1/(barn*cm)]
				[wt.-%]	[at.-%]	
UO <sub>2</sub>	100,0	U	237,9336 <sup>3</sup>			2,3280E-02 <sup>4</sup>
		<sup>234</sup> U	234,0409	0,0306	0,0311	7,2421E-06
		<sup>235</sup> U	235,0439	3,8080	3,8548	8,9739E-04
		<sup>236</sup> U	236,0456	0,0020	0,0020	4,6932E-07
		<sup>238</sup> U	238,0508	96,1594	96,1121	2,2375E-02
		O	15,9994 <sup>3</sup>			4,6559E-02
UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Brennstab						
Bestandteil	Zusammensetzung [wt.-%]	Element <sup>1</sup> / Isotop	Mittlere Atommasse [u]	Anteil im Element		Kernzahl-dichte <sup>2</sup> [1/(barn*cm)]
				[wt.-%]	[at.-%]	
UO <sub>2</sub>	93,0	U	237,9707 <sup>3</sup>			2,1014E-02 <sup>4</sup>
		<sup>234</sup> U	234,0409	0,023	0,024	4,9444E-06
		<sup>235</sup> U	235,0439	2,600	2,632	5,5318E-04
		<sup>236</sup> U	236,0456	0,000	0,000	0,0000E+00
		<sup>238</sup> U	238,0508	97,377	97,344	2,0456E-02
		O	15,9994 <sup>3</sup>			4,2029E-02
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,0	Gd	157,2521 <sup>3</sup>			2,3560E-03 <sup>4</sup>
		<sup>152</sup> Gd	151,9198	0,193	0,20	4,7119E-06
		<sup>154</sup> Gd	153,9209	2,134	2,18	5,1360E-05
		<sup>155</sup> Gd	154,9226	14,581	14,80	3,4868E-04
		<sup>156</sup> Gd	155,9221	20,297	20,47	4,8226E-04
		<sup>157</sup> Gd	156,9240	15,617	15,65	3,6871E-04
		<sup>158</sup> Gd	157,9241	24,946	24,84	5,8522E-04
		<sup>160</sup> Gd	159,9271	22,232	21,86	5,1501E-04
		O	15,9994 <sup>3</sup>			3,5339E-03 <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sauerstoff wurde bei der Berechnung der Kernzahldichten als Element behandelt und nicht nuklidweise unterschieden; im Rechenmodell wurde es zu 100 % <sup>16</sup>O mit der gegebenen Kernzahldichte modelliert.

<sup>2</sup> Die berücksichtigten nuklidweise Brennstoffzusammensetzungen sind durch die hellblau unterlegten Einträge gegeben. Im Fall des UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Brennstabs sind die beiden Sauerstoffbeiträge zu addieren.

<sup>3</sup> Mittleres Atomgewicht des jeweiligen Elements.

<sup>4</sup> Kernzahldichte des jeweiligen Elements (= Summe der Kernzahldichten der Isotope).

## Bestrahlungsgeschichte

Zur Modellierung der Bestrahlungsgeschichte, also des zeitlichen Verlaufs von Leistung, Brennstofftemperatur, Hüllrohrtemperatur, Moderatortemperatur und Borkonzent-

ration, wurden die Werte aus Tab. 2.92 genutzt. Dazu wurde angenommen, dass die Angaben in Tab. 2.92 jeweils über das jeweilige Zeitintervall gemittelte Werte sind (vgl. Kap. 2.6.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Die Unterteilung der Zeitschritte in Tab. 2.92 wurde ebenfalls übernommen. Es wurde lediglich der erste Zeitschritt nochmals geteilt, so dass ein zusätzlicher kurzer Zeitschritt von 0,1 Tag zu Beginn jedes Zyklus entstand. Zudem wurde die Länge der offensichtlich als „effective (full) power days“ gegebenen Zeitschritte separat für jeden Zyklus so skaliert, dass die Zeitschritte eines Zyklus in der Summe die tatsächliche kalendarische Länge des Zyklus wiedergeben. Um dennoch dieselben Abbrandwerte je Zyklus zu erreichen, wurden im Gegenzug die Leistungswerte zyklusweise mit dem jeweiligen Kehrwert des zuvor genannten Skalierungsfaktors multipliziert. Um letztlich den messtechnisch ermittelten Endabbrand der Probe in der Abbrandrechnung zu erzielen, wurden die Leistungswerte anschließend mit einem über die gesamte Leistungsgeschichte konstanten Faktor skaliert, so dass die für den Abbrandindikator  $^{148}\text{Nd}$  rechnerisch erzielte Nuklidkonzentration mit dem gemessenen Wert innerhalb von 0,2 % übereinstimmt. Weitere Änderungen an den angegebenen Werten wurden nicht vorgenommen. Die so resultierende Bestrahlungsgeschichte ist in Tab. 2.96 zusammengefasst. Die dort angegebenen relativen Leistungen je Zeitschritt beziehen sich auf das Maximum der Leistungsgeschichte, welches bereits im ersten Zeitschritt erreicht wird und für beide Rechenmodellvarianten etwa 63,21 MW/tHM beträgt<sup>18</sup>.

Die in Tab. 2.92 angegebene Leistungsgeschichte wird zwar in /SCK 05b/ als repräsentative Leistungsgeschichte für die Probenposition angenommen, tatsächlich ist sie aber die gemittelte Leistungsgeschichte der mittleren zwei Meter Länge der 16 zentralen Stäbe des Brennelements (vgl. Kap. 2.6.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Zudem wird von MOTIVE die angegebene Leistung bislang grundsätzlich auf das gesamte Rechenmodell bezogen, d. h. in den vorgenommenen Probennachrechnungen wurden die angegebene Leistungswerte als mittlere Brennelementleistungen angewendet. Bei der Verwendung der gegebenen Leistungsgeschichte ist somit zu unterstellen, dass sich die mittlere Leistung entlang der mittleren zwei Meter Länge der zentralen 16 Stäbe, die mittlere Leistung im analogen Abschnitt aller Stäbe sowie die Leistung an der Probenposition nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Dabei

---

<sup>18</sup> Die angepassten Leistungen unterscheiden sich für beide Rechenmodelle (detailliertes oder vereinfachtes Rechenmodell, Abb. 2.45) um weniger als 0,05 MW/tHM. Der im Text gegebenen Werte ist der Mittelwert für beide Modelle.

sind zeitlich konstante relative Unterschiede zwischen den genannten Leistungen unproblematisch, da diese für die Probenposition durch die abschließende Leistungsnormierung anhand von  $^{148}\text{Nd}$  kompensiert werden. Der in /SCK 04/ für die Probenposition angegebene Leistungsverlauf gibt allerdings einen Hinweis auf mögliche sich zeitlich verändernde relative Unterschiede zwischen den genannten Leistungen im Verlauf der Zyklen (vgl. Kap. 2.6.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Somit wird ggf. durch die hier vorliegende Verwendung der Leistungsgeschichte durch MOTIVE eine vom tatsächlichen Verlauf abweichende Leistungsgeschichte modelliert und so ein gewisser Fehler in die Abbrandrechnung eingebracht wird. Eine verbesserte Modellierung kann dadurch erzielt werden, indem die angegebene Leistungsgeschichte nur auf die mittleren 16 Stäbe bezogen wird. Diese Möglichkeit bietet MOTIVE bislang aber noch nicht. Aber auch in diesem Fall ist aufgrund der Mittelung über die mittleren zwei Meter Länge der Brennstäbe zu unterstellen, dass die Form der Leistungsprofile in diesem Bereich der zentralen 16 Stäbe keine unterschiedliche zeitliche Entwicklung nimmt, dem aber /SCK 04/ zu widersprechen scheint (s. o.), und sonstige Unterschiede in der Leistung der Stäbe durch die Verwendung der zweidimensionalen Rechenmodellgeometrie und der separaten Modellierung der Stäbe ausreichend genau wiedergegeben werden.

Auch für die angegebenen Brennstoff- und Moderatortemperaturen ist anzunehmen, dass sie über die mittleren zwei Meter Länge der zentralen 16 Brennstäbe gemittelte Werte wiedergeben (vgl. Kap. 2.6.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“). Zudem ist es insbesondere in MOTIVE bislang nur möglich eine einheitliche Brennstofftemperatur für alle Brennstoffmaterialien anzugeben, wodurch in der Nachrechnung allen Brennstäben dieselbe Brennstofftemperatur zugeordnet wird. Tatsächlich ist aber zu erwarten, dass die Brennstäbe entsprechend ihrer Leistung unterschiedliche Temperaturen aufwiesen. So wird durch dieses Vorgehen ebenfalls ein gewisser Fehler in die Abbrandrechnung eingebracht. Die Maßgabe, die Abbrandrechnung möglichst mit den gegebenen Daten durchzuführen, lässt sich mit der derzeitigen MOTIVE-Version aber nur in dieser Weise erfüllen.

Zusätzlich zur Moderatortemperatur wurde der nominelle Moderatordruck von 158 bar zur Berechnung der Moderatorichte verwendet. Dementsprechend wurde die zusätzlich in /SCK 05b/ angegebene Moderatorichte nicht weiter berücksichtigt, bzw. durch eine aktuelle Parametrisierung der Wasserzustandsgleichung neu berechnet (vgl. Kap. 2.6.1, Abschnitt „Bestrahlungsgeschichte“).

**Tab. 2.96** Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 5 bis 8 für das Brennelement 419 aus GKN-II nach /SCK 05b/

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Moderatortemperatur [K]	Brennstofftemperatur [K]	Rel. Leistung bezogen auf Maximum
5	0,1	0,1	965,6	592,7	1030,4	100,000
	5,92	6,02	965,6	592,7	1030,4	100,000
	24,08	30,10	876,6	592,6	1029,4	98,304
	30,10	60,20	783,2	592,5	1028,5	96,512
	30,10	90,30	681,8	593,0	1030,9	94,654
	30,10	120,40	583,2	593,4	1030,2	94,008
	30,10	150,50	489,4	593,7	1028,6	93,508
	30,10	180,60	400,9	594,2	1027,4	93,266
	30,10	210,70	308,3	594,3	1021,4	92,636
	30,10	240,80	206,9	593,9	1008,1	90,682
	30,10	270,90	99,4	593,7	993,7	88,647
	25,48	296,38	10,0	593,4	981,8	87,096
	14,65	311,03	10,0	587,5	957,8	83,026
	Revision	22,0	333,03			
6	0,1	333,13	1175,9	590,0	964,0	82,651
	5,97	339,10	1175,9	590,0	964,0	82,651
	24,27	363,37	1088,9	589,9	952,7	81,753
	30,33	393,70	998,8	589,6	937,7	80,087
	30,33	424,03	898,8	589,8	926,1	78,404
	30,33	454,36	800,2	589,9	917,1	77,844
	30,33	484,69	706,1	590,0	909,5	77,443
	30,33	515,02	617,3	590,1	902,7	77,187
	30,33	545,35	529,3	590,1	894,6	76,706
	30,33	575,68	432,0	589,7	883,5	75,136
	30,33	606,01	323,7	589,2	872,7	73,325
	30,33	636,34	212,4	589,0	863,5	71,674
	30,33	666,67	101,8	588,8	855,4	70,681
	25,28	691,95	10,0	588,9	849,4	70,104
	32,05	724,00	10,0	575,2	802,0	64,752
Revision	17,0	741,00				0,000

Zyklus	Zeitschritt [d]	Akkumulierte Zeit im Reaktor [d]	Borkonzentration [ppm]	Moderatortemperatur [K]	Brennstofftemperatur [K]	Rel. Leistung bezogen auf Maximum
7	0,1	741,10	1016,0	585,9	832,5	66,684
	5,90	747,00	1016,0	585,9	832,5	66,684
	24,01	771,01	926,5	585,8	828,5	66,344
	30,01	801,02	833,8	585,7	823,4	65,632
	30,01	831,03	732,3	585,9	820,2	65,291
	30,01	861,04	632,7	586,2	818,6	65,502
	30,01	891,05	537,4	586,4	817,4	65,858
	30,01	921,06	447,5	586,8	816,7	66,296
	30,01	951,07	355,7	586,6	812,6	65,939
	30,01	981,08	255,0	586,2	805,4	64,579
	30,01	1011,09	148,6	585,8	799,2	63,008
	38,91	1050,00	7,8	585,9	793,3	62,311
	39,01	1089,01	7,8	568,8	738,1	55,962
	Revision	15,0	1104,01			
8	0,1	1104,11	1228,9	570,8	634,6	18,225
	5.94	1110,05	1228,9	570,8	634,6	18,225
	24.15	1134,20	1119,9	571,0	635,7	18,467
	30.19	1164,39	1001,3	571,2	636,4	18,644
	30.19	1194,58	874,3	571,4	637,4	18,982
	30.19	1224,77	749,2	571,7	638,6	19,352
	30.19	1254,96	627,3	571,9	640,0	19,819
	30.19	1285,15	509,1	572,1	641,6	20,350
	30.19	1315,34	395,4	572,4	643,4	20,930
	30.19	1345,53	282,6	572,6	644,9	21,316
	30.19	1375,72	169,4	572,7	646,2	21,767
	42.67	1418,39	11,9	573,2	648,0	22,250
	34.62	1453,01	11,9	560,2	626,7	20,704

Als Zerfallszeit nach Ende der Bestrahlung wird für jedes Nuklid dessen individueller Zeitraum zwischen Ende der Bestrahlung und Zeitpunkt der Messung berücksichtigt. Ausnahmen bilden die Nuklide  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$  und  $^{155}\text{Gd}$ , bei denen die Messung die Konzentration zum Zeitpunkt der Separation dieser Nuklide von ihren Tochter- bzw. Mutternukliden und nicht zum eigentlichen Zeitpunkt der Messung abbildet. Bei  $^{241}\text{Pu}$  ist dies der Fall, da aufgrund der Messmethode, in diesem Fall die Massenspektrometrie, das Tochternuklid  $^{241}\text{Am}$  aus Zerfällen nach der Separation nicht mehr von  $^{241}\text{Pu}$  unterschieden werden kann. Dagegen sind  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$  und

<sup>155</sup>Gd Tochternuklide, die nach der Separation von ihren Mutternukliden nicht mehr nachgebildet werden. Daher wird für diese Nuklide in der Nachrechnung statt des Zeitraums bis zur Messung, der Zeitraum bis zur Separation von ihren Tochter- bzw. Mutternukliden als Abklingzeit berücksichtigt. Die im Einzelnen in der Nachrechnung herangezogenen Abklingzeiten sind in Tab. 2.97 zusammengestellt.

**Tab. 2.97** Berücksichtigte dividuelle Zerfallszeiten der errechneten Nuklidkonzentrationen des Brennelements 419 aus GKN-II nach /SCK 06/

Nuklid	Abklingzeit [d]	Nuklid	Abklingzeit [d]	Nuklid	Abklingzeit [d]
<sup>234</sup> U	2672	<sup>245</sup> Cm	2846	<sup>153</sup> Eu	2735
<sup>235</sup> U	2672	<sup>144</sup> Ce	2600	<sup>154</sup> Eu	2600
<sup>236</sup> U	2672	<sup>142</sup> Nd	2753	<sup>155</sup> Eu	2600
<sup>238</sup> U	2672	<sup>143</sup> Nd	2753	<sup>155</sup> Gd	2630
<sup>237</sup> Np	2813	<sup>144</sup> Nd	2623	<sup>133</sup> Cs	2648
<sup>238</sup> Pu	2635	<sup>145</sup> Nd	2753	<sup>135</sup> Cs	2648
<sup>239</sup> Pu	2635	<sup>146</sup> Nd	2753	<sup>137</sup> Cs	2600
<sup>240</sup> Pu	2635	<sup>148</sup> Nd	2753	<sup>95</sup> Mo	2813
<sup>241</sup> Pu	2623	<sup>150</sup> Nd	2753	<sup>99</sup> Tc	2813
<sup>242</sup> Pu	2635	<sup>147</sup> Sm	2630	<sup>101</sup> Ru	2813
<sup>241</sup> Am	2623	<sup>148</sup> Sm	2735	<sup>103</sup> Rh	2813
<sup>242(m)</sup> Am	2760	<sup>149</sup> Sm	2735	<sup>105</sup> Pd	2813
<sup>243</sup> Am	2760	<sup>150</sup> Sm	2735	<sup>108</sup> Pd	2813
<sup>242</sup> Cm	2601	<sup>151</sup> Sm	2735	<sup>109</sup> Ag	2813
<sup>243</sup> Cm	2760	<sup>152</sup> Sm	2735		
<sup>244</sup> Cm	2601	<sup>154</sup> Sm	2735		

### 2.6.3 Resultate

Die aufgrund der nicht exakten 1/8-Brennelementsymmetrie betrachteten zwei Rechenmodelle (detailliertes und vereinfachtes Rechenmodell, Abb. 2.45) zeigen in ihren Resultaten nur geringe Unterschiede. So weichen die errechneten Nuklidkonzentrationen für alle Nuklide deutlich weniger als 1,0 % voneinander ab, in den meisten Fällen liegt diese Abweichung sogar nur bei etwa 0,1 %. Im Vergleich mit den Messwerten können diese Abweichungen zwischen den Rechenmodellen vernachlässigt werden, so dass hier jeweils nur die Resultate des vereinfachten Rechenmodells mit den Messergebnissen verglichen wurden.

Der Vergleich zwischen Rechnung und Experiment für die Probe M11 ist in Tab. 2.98 und in Abb. 2.46 dargestellt. Bei der graphischen Darstellung wurde dabei auf die beiden Palladium-Nuklide verzichtet, bei denen die Rechnung um etwa 50 % höhere Werte ergeben hat, als nach den experimentellen Ergebnissen zu erwarten war. Zu erkennen ist eine leichte Unterschätzung von  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$ , was auf ein zu weiches Neutronenspektrum in der Rechnung schließen lässt. Auch die übrigen Plutonium-Nuklide werden leicht unterschätzt. Die Unterschätzung der Curium-Nuklide fällt hingegen im Vergleich zu anderen Daten relativ klein aus. Gute Übereinstimmungen werden auch für die Neodym-, Samarium-, Europium- und Gadolinium-Nuklide sowie für die Cäsium-Nuklide. Bei den metallischen Spaltprodukten ist das Bild gemischt. Während  $^{95}\text{Mo}$  und  $^{99}\text{Tc}$  im Rahmen der experimentellen Unsicherheiten gut getroffen werden, sind die Abweichungen bei  $^{101}\text{Ru}$ ,  $^{103}\text{Rh}$  und  $^{109}\text{Ag}$  größer.

**Tab. 2.98** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %

Nuklid	M11	Nuklid	M11	Nuklid	M11
$^{234}\text{U}$	5,4	$^{245}\text{Cm}$	-13,0	$^{145}\text{Nd}$	0,4
$^{235}\text{U}$	-6,0	$^{95}\text{Mo}$	10,7	$^{146}\text{Nd}$	-0,9
$^{236}\text{U}$	0,4	$^{99}\text{Tc}$	-4,1	$^{148}\text{Nd}$	0,1
$^{238}\text{U}$	0,0	$^{101}\text{Ru}$	27,3	$^{150}\text{Nd}$	-0,1
$^{237}\text{Np}$	17,0	$^{103}\text{Rh}$	20,4	$^{147}\text{Sm}$	-0,9
$^{238}\text{Pu}$	-4,1	$^{105}\text{Pd}$	50,1	$^{148}\text{Sm}$	-7,4
$^{239}\text{Pu}$	-5,0	$^{108}\text{Pd}$	55,5	$^{149}\text{Sm}$	-4,3
$^{240}\text{Pu}$	-4,5	$^{109}\text{Ag}$	25,2	$^{150}\text{Sm}$	-0,5
$^{241}\text{Pu}$	-8,5	$^{133}\text{Cs}$	5,2	$^{151}\text{Sm}$	-10,9
$^{242}\text{Pu}$	-3,7	$^{135}\text{Cs}$	-3,9	$^{152}\text{Sm}$	-1,0
$^{241}\text{Am}$	11,0	$^{137}\text{Cs}$	-3,4	$^{154}\text{Sm}$	-1,1
$^{242\text{m}1}\text{Am}$	-22,6	$^{144}\text{Ce}$	-3,8	$^{153}\text{Eu}$	-4,3
$^{243}\text{Am}$	9,8	$^{142}\text{Nd}$	-7,6	$^{154}\text{Eu}$	4,5
$^{242}\text{Cm}$	-19,5	$^{143}\text{Nd}$	-1,2	$^{155}\text{Eu}$	-18,1
$^{243}\text{Cm}$	-1,2	$^{144}\text{Nd}$	-0,3	$^{155}\text{Gd}$	-6,3
$^{244}\text{Cm}$	-12,4				

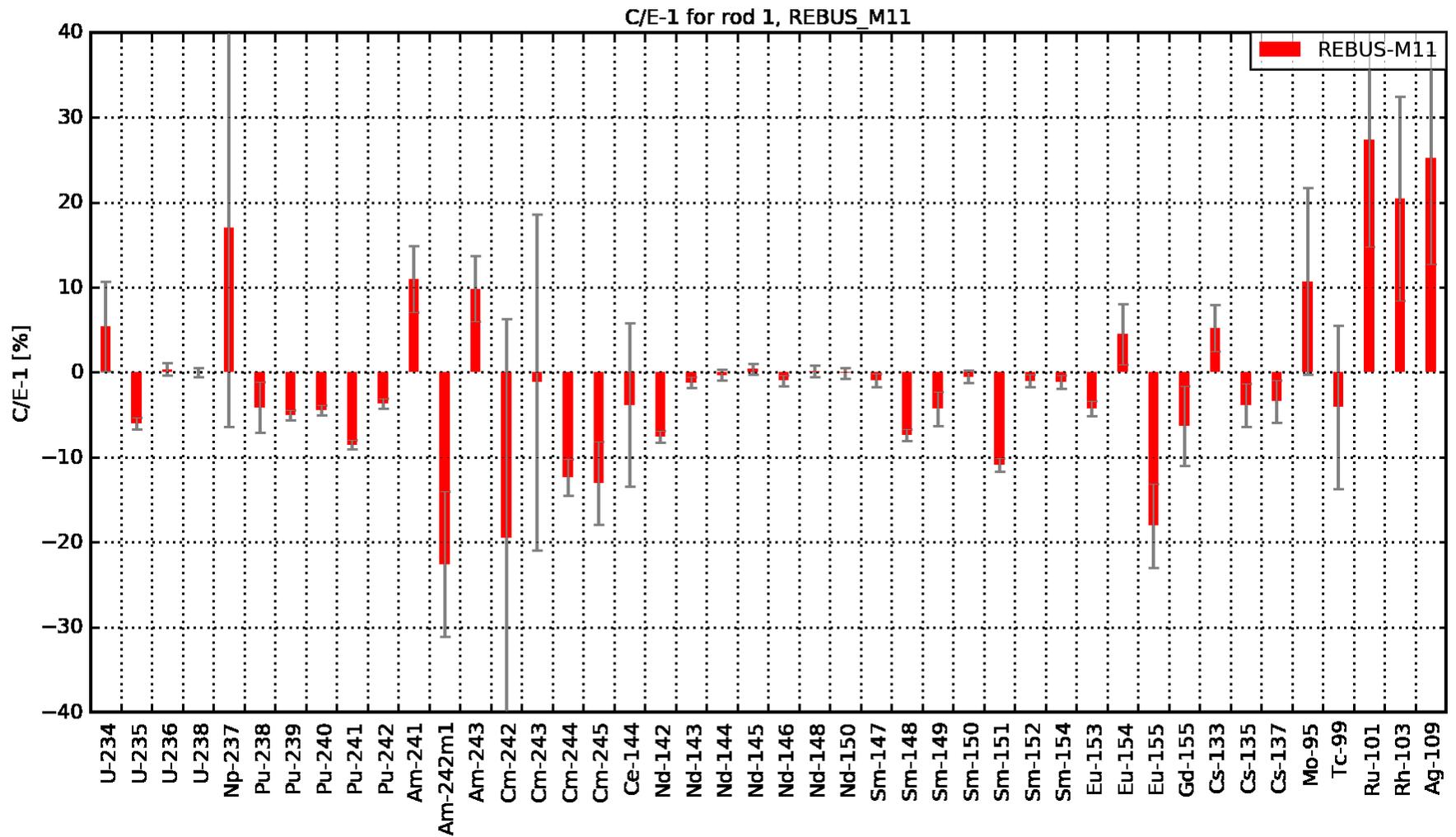


Abb. 2.46 REBUS, M11: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

## 2.7 Proben des Reaktors Calvert Cliffs-1

Aus dem US-amerikanischen Druckwasserreaktor Calvert Cliffs-1 (900 MWe) stammen insgesamt neun Nachbestrahlungsanalyseproben, die jeweils einem Brennstab aus drei verschiedenen Brennelementen entnommen wurden. Die Proben wurden über drei bzw. vier Zyklen bestrahlt und haben Abbrände im Bereich zwischen 18,7 und 46,5 GWd/tSM. Die Angaben zu Brennelementgeometrie, Materialdaten und Abbrandhistorien stammen im Wesentlichen aus den Dokumenten /GUE 88a/, /GUE 88b/, /GUE 91/, /BIE 94/, /ROD 86/, /PAT 82/, /TAL 01/. Die Daten wurden beim Einpflegen in die SFCOMPO2.0 Datenbank /MIC 17/ teilweise noch einmal überarbeitet, so dass einige Angaben direkt von dort übernommen wurden. Die Messungen sind im Rahmen des amerikanischen Endlagerforschungsprogramms erstellt worden und enthalten daher auch einige für den Endlagersicherheitsnachweis relevante Spaltprodukte.

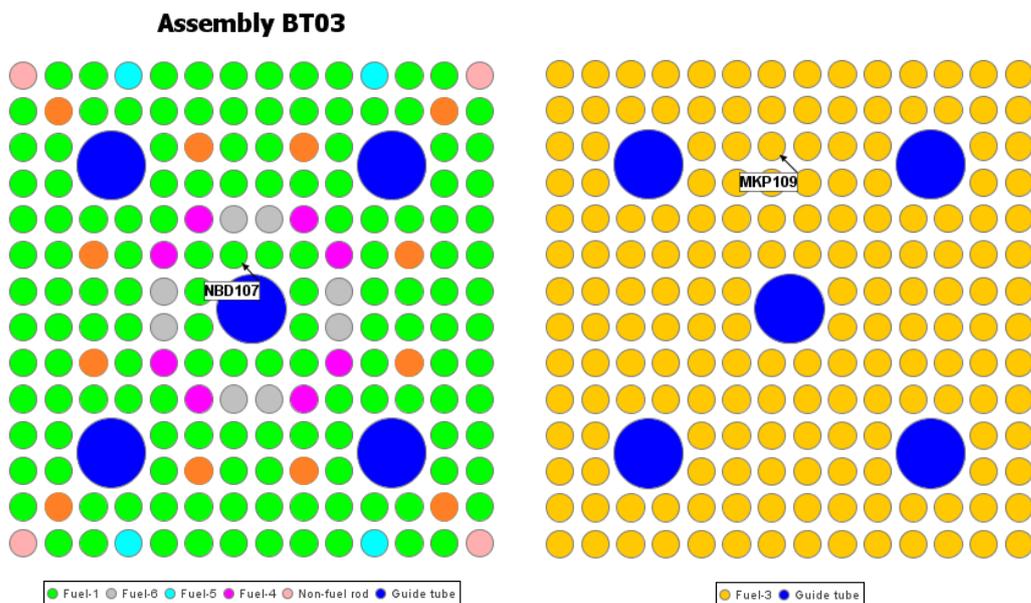
### 2.7.1 Experimentelle Daten

Bei den drei Brennelementen handelt es sich um 14 x 14 Brennelemente der Firma Combustion Engineering mit fünf großen Steuerstabführungsrohren, die jeweils den Platz von 2 x 2 normalen Brennstäben einnehmen. Die Brennelemente D047 und D101 sind Standardbrennelemente mit Stäben einer Anreicherung von 2,72 bzw. 3.038 wt% <sup>235</sup>U. Bei dem Brennelement mit der Bezeichnung BT03 handelt es sich um ein Sonderbrennelement mit einem komplexeren Aufbau. Beide Geometrien sind in Abb. 2.47 dargestellt.

Gemäß /PAT 82/ sind im Brennelement während der Bestrahlungsgeschichte einige Stabwechsel vorgenommen worden, die allerdings in der Literatur nicht vollständig nachvollzogen werden können. Daher wurde für die Validierungsrechnung die in der SFCOMPO 2.0 dargestellte Geometrie verwendet, bei der auf Stabwechsel verzichtet wird. Bei den Eckstäben handelt es sich um Brennstoff-freie Stäbe, die ein Edelgasgefülltes Stahlrohr aus Edelstahl (SS304) enthalten. Gemäß /RAD 10/ enthielt das Brennelement BT03 im ersten Zyklus zwölf Stäbe mit abbrennbaren Absorbern in Form von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C-Pellets. Diese sind in Abb. 2.47 in Orange gekennzeichnet. Zu beachten ist, dass diese Stäbe in der SFCOMPO nicht erwähnt werden. Die Stäbe wurden nach dem ersten Zyklus gezogen, so dass das Brennelement für den Rest der Leistungsgeschichte an diesen Positionen Leerstellen aufwies. Die übrigen Stäbe weisen Anreicherungen von 2,453 wt% (Fuel-1 und Fuel-6), 2,33 wt% (Fuel-4) und 2,82 wt% (Fuel-5)

$^{235}\text{U}$  auf. In Tab. 2.99 sind die relevanten geometrischen Abmessungen der Brennelemente wiedergegeben, in Tab. 2.100 die relevanten gemeinsamen geometrischen Abmessungen der Brennstäbe, Führungsrohre. Die Daten zu den abbrennbaren Absorberstäben und den nicht brennstoffhaltigen Stäben finden sich in Tab. 2.101.

In Tab. 2.102 sind allgemeine Angaben zur Bestrahlungsgeschichte der drei Brennstäbe dargestellt. Diese werden in Tab. 2.103 um Angaben zu Probenposition, Probenabbbrand, Brennstofftemperaturen und Moderatortemperaturen ergänzt. Die Brennstoffzusammensetzungen für die verschiedenen Anreicherungen sind in Tab. 2.104 gegeben. Bei der Berechnung der Kernzahldichten wurde dabei von einer Massendichte des Brennstoffs von  $10,234 \text{ g/cm}^3$  (D101),  $10,249 \text{ g/cm}^3$  (D047) und  $10,141 \text{ g/cm}^3$  (BT03) ausgegangen. Es handelt sich dabei um effektive Dichten, die jeweils die Aussparungen an den Pelletstirnseiten („Pellet Dishing“) berücksichtigen. Die Zusammensetzung von Zirkalloy-4 (siehe Tab. 2.105) und dem Edelstahl SS304 (siehe Tab. 2.106) sind jeweils der SCALE Materialbibliothek entnommen. Die Materialzusammensetzung des Absorbermaterials (Tab. 2.107) stammt aus /RAD 10/.



**Abb. 2.47** Brennelementgeometrien der Brennelemente BT03 (links) sowie D047 und D101 (rechts) aus Calvert Cliffs-1 (aus SFCOMPO 2.0)

**Tab. 2.99** Geometrische Abmessungen der Brennelemente D047, D101 und BT03

Parameter	
Gittertyp	15x15
Brennstababstand [cm]	1,473
Brennelementabstand [cm]	20,78
Brennstablänge [cm]	373
Aktive Brennstablänge [cm]	347,2
Anzahl Brennelemente im Kern	176
Anzahl Führungsrohre	5

**Tab. 2.100** Geometrische Abmessungen der Brennstäbe und Führungsrohre für die Brennelemente D047, D101 und BT03

Parameter	
Durchmesser Brennstoff [cm]	0,9563
Durchmesser Hüllrohr innen [cm]	0,9855
Durchmesser Hüllrohr außen [cm]	1,1176
Material Hüllrohr	Zircaloy-4
Dichte Hüllrohr [g/cm <sup>3</sup> ]	6,32
Durchmesser Führungsrohre innen [cm]	2,629
Durchmesser Führungsrohre außen [cm]	2,832
Material Führungsrohre	Zircaloy-4
Dichte Führungsrohrmaterial [g/cm <sup>3</sup> ]	6,32

**Tab. 2.101** Zusätzliche geometrische Abmessungen für das Brennelement BT03

Parameter	
Durchmesser abbrennbarer Absorber [cm]	0,9550
Brennstofffreie Stäbe:	
Durchmesser Stahlrohr außen [cm]	0,9450
Durchmesser Stahlrohr innen [cm]	0,660
Material Stahlrohr	SS304

**Tab. 2.102** Relevante Details der Brennstäbe MLA098, MKP109 und NBD107

Parameter	MLA098	MKP109	NBD107
BE	D101	D047	BT03
Probenserie	ATM-103	ATM-104	ATM-106
Anzahl Bestrahlungszyklen	3	4	4
Bestrahlungsdauern [Tage] (Ruhezeiten [Tage])	306 (71)	306 (71)	816 (81)
	382 (81)	382 (81)	306 (71)
	466	466 (85)	382 (81)
		461	466

**Tab. 2.103** Abbrand und axiale Probenposition der Proben aus Calvert Cliffs-1

Stab	MLA098			MKP109			NBD107		
	P	BB	JJ	P	CC	LL	Q	GG	MM
Probenabbrand [GWd/tSM]	33,17	26,62	18,68	44,34	37,12	27,35	46,46	37,27	31,4
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	164,2	26,7	11,3	163,7	27,0	12,3	163,6	22,3	13,7
Brennstofftemperatur [°C]									
Zyklus 1	-	-	-	-	-	-	1132	1097	960
Zyklus 2	997	940	829	997	940	829	997	940	829
Zyklus 3	958	927	850	958	927	850	958	927	850
Zyklus 4	794	793	775	794	793	775	794	793	775
Zyklus 5	-	-	-	747	712	709	-	-	-
Moderator-temperatur [°C]	570	557,6	557,2	569,9	557,6	557,2	569,9	557,4	557,3

**Tab. 2.104** Brennstoffzusammensetzungen für die drei Brennelemente aus Calvert Cliffs-1

BE	D101		D047			
Stab	MLA098 (ATM-103)		MKP109 (ATM-104)			
Isotop	Anteil [Gew. %]	Kernzahl-dichten [1/barn*cm]	[Gew. %]	Kernzahl-dichten [1/barn*cm]		
<sup>234</sup> U	0,022	5.6192E-06	0,025	6.2852E-06		
<sup>235</sup> U	2,72	6.2868E-04	3,083	7.0319E-04		
<sup>238</sup> U	97,258	2.2195E-02	96,912	2.2154E-02		
O		4.5659E-02		4.5726E-02		
BE	BT03					
Stab	NBD107 (ATM-106)		UO <sub>2</sub> 2,33 wt%		UO <sub>2</sub> 2,82 wt%	
Isotop	Anteil [Gew. %]	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]	Anteil [Gew. %]	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]	Anteil [Gew. %]	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]
<sup>234</sup> U	0,022	4.9694E-06	0,021	4.7203E-06	0,025	5.7129E-06
<sup>235</sup> U	2,453	5.5598E-04	2,33	5.2810E-04	2,82	6.3916E-04
<sup>236</sup> U	0,011	2.5467E-06	0,011	2.4190E-06	0,013	2.9277E-06
<sup>238</sup> U	97,527	2.1823E-02	97,65	2.1851E-02	97,16	2.1739E-02
O		4.4772E-02				4.4774E-02

**Tab. 2.105** Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-4

Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]	Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]
Zr	98,23	<sup>90</sup> Zr	2,2584E-02	Fe	0,21	<sup>54</sup> Fe	8,9797E-06
		<sup>91</sup> Zr	4,8708E-03			<sup>56</sup> Fe	1,3593E-04
		<sup>92</sup> Zr	7,3642E-03			<sup>57</sup> Fe	3,0841E-06
		<sup>94</sup> Zr	7,3042E-03			<sup>58</sup> Fe	4,0336E-07
		<sup>96</sup> Zr	1,1522E-03	Cr	0,1	<sup>50</sup> Cr	3,4330E-06
Sn	1,45	<sup>112</sup> Sn	4,9610E-06			<sup>52</sup> Cr	6,3655E-05
		<sup>114</sup> Sn	3,3163E-06			<sup>53</sup> Cr	7,0818E-06
		<sup>115</sup> Sn	1,6936E-06			<sup>54</sup> Cr	1,7302E-06
		<sup>116</sup> Sn	7,1800E-05			Hf	0,125
		<sup>117</sup> Sn	3,7601E-05	<sup>176</sup> Hf	1,1523E-07		
		<sup>118</sup> Sn	1,1757E-04	<sup>177</sup> Hf	4,1182E-07		
		<sup>119</sup> Sn	4,1349E-05	<sup>178</sup> Hf	6,0418E-07		
		<sup>120</sup> Sn	1,5552E-04	<sup>179</sup> Hf	3,0166E-07		
		<sup>122</sup> Sn	2,1739E-05	<sup>180</sup> Hf	7,7689E-07		
<sup>124</sup> Sn	2,6747E-05	<sup>174</sup> Hf	3,5856E-09				

**Tab. 2.106** Zusammensetzung von Edelstahl (SS304) gemäß /REA 17/

Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kernzahl- dichte [1/barn*cm]	Element	Anteil [wt.-%]	Isotope	Kernzahl- dichte [1/barn*cm]
Fe	68,375	<sup>54</sup> Fe	3,4218E-03	Ni	9,5	<sup>58</sup> Ni	5,2686E-03
		<sup>56</sup> Fe	5,3715E-02			<sup>60</sup> Ni	2,0295E-03
		<sup>57</sup> Fe	1,2405E-03			<sup>61</sup> Ni	8,8219E-05
		<sup>58</sup> Fe	1,6509E-04			<sup>62</sup> Ni	2,8128E-04
Cr	19,0	<sup>50</sup> Cr	7,5916E-04	Si	1,0	<sup>64</sup> Ni	7,1634E-05
		<sup>52</sup> Cr	1,4640E-02			<sup>28</sup> Si	1,5701E-03
		<sup>53</sup> Cr	1,6600E-03			<sup>29</sup> Si	7,9761E-05
		<sup>54</sup> Cr	4,1321E-04			<sup>30</sup> Si	5,2640E-05
Mn	2,0	<sup>55</sup> Mn	1,7407E-03	C	0,08	<sup>12</sup> C	3,1507E-04
P	0,045	<sup>31</sup> P	6,9467E-05			<sup>13</sup> C	3,4077E-06

**Tab. 2.107** Zusammensetzung des abbrennbaren Absorbers Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C

Element	Isotope	Kernzahldichte [1/barn*cm]	Element	Isotope	Kernzahldichte [1/barn*cm]
B	<sup>10</sup> B	8,5900E-04	Al	<sup>27</sup> Al	3,9000E-02
	<sup>11</sup> B	3,4400E-03	O	<sup>16</sup> O	5,7859E-02
C	<sup>12</sup> C	1,0586E-03		<sup>17</sup> O	2,2040E-05
	<sup>13</sup> C	1,1449E-05		<sup>18</sup> O	1,1890E-04

**Tab. 2.108** Leistungsgeschichtedaten für die Proben des Stabs MLA098

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]		
			P	CC	LL
2	7	654	27,404	15,371	10,112
	37,8	614	33,572	20,629	13,803
	54,1	563	33,370	21,134	14,157
	65,5	533	33,370	21,539	14,460
	78	507	33,168	21,943	14,865
	101,7	468	32,410	22,398	15,219
	124,5	418	32,561	23,309	15,977
	147,7	368	32,207	23,915	16,533
	155,8	333	32,056	24,016	16,685
	187,2	290	32,056	25,028	17,595
	221,5	218	33,016	25,533	18,151
	237,9	162	32,258	26,544	18,960
	257,1	122	31,651	26,342	18,960
	269,9	86	31,853	26,696	19,264
	304,1	36	30,084	25,179	18,354
	306	0	30,134	25,179	18,404
	377	0	0,000	0,000	0,000
3	384,9	883	37,769	19,466	13,298
	399,3	862	36,404	19,972	13,702
	419	837	25,483	15,724	10,820
	435,8	808	39,387	23,157	16,078
	452,1	775	39,336	24,320	16,938
	467,5	741	41,258	26,949	18,910
	506,6	684	37,668	26,443	18,758
	537,8	611	37,263	27,808	19,972
	569,6	545	36,404	28,516	20,629
	601,4	478	35,494	29,073	21,236
	645,7	368	35,039	29,983	22,146
	670,7	291	0,000	0,000	0,000
	729,8	224	34,836	31,348	23,612
	758,7	120	35,999	32,966	25,028
	839,7	83	0,000	0,000	0,000
4	885,8	960	33,320	20,073	14,106
	909,8	889	33,067	20,781	14,713
	932,4	827	32,511	21,691	15,522
	958,1	759	32,005	23,056	16,635

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]		
			P	CC	LL
	988,3	706	15,421	10,972	7,938
	1029,5	788	16,078	12,438	9,050
	1079,8	720	15,168	11,882	8,696
	1090,8	673	26,443	21,893	16,078
	1123,6	527	31,196	26,848	19,870
	1147,1	460	30,943	27,404	20,578
	1176,5	370	30,084	27,050	20,477
	1204,6	301	30,690	28,112	21,488
	1270	191	30,235	28,668	22,348
	1305,7	73	30,438	29,679	23,359
	1390,7	31	0,000	0,000	0,000
5	1455,7	919	23,005	13,500	10,011
	1461,2	911	24,269	14,713	10,871
	1467,8	896	24,269	15,067	11,123
	1496,4	854	24,219	15,927	11,932
	1527,6	784	23,865	16,988	12,842
	1554,6	715	23,915	17,797	13,449
	1577,3	655	23,814	18,354	14,005
	1604,4	603	20,477	16,281	12,438
	1659,6	521	21,943	18,404	14,208
	1680,5	434	24,016	20,629	16,028
	1722,4	356	24,219	21,438	16,786
	1744	281	24,269	21,741	17,090
	1771,6	226	22,702	20,427	16,230
	1790,6	173	24,623	22,702	18,050
1851,8	79	20,224	19,163	15,421	

**Tab. 2.109** Leistungsgeschichtedaten für die Proben des Brennelement D047

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]	Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]
2	7,1	654	29,477	4	504,2	684	32,718
	37,9	614	36,268		535,2	611	32,873
	54,3	563	36,268		566,8	545	32,718
	65,7	533	36,268		598,4	478	32,255
	78,2	507	36,268		642,3	368	32,255
	101,6	468	36,268		667,3	291	0,000
	124,4	418	36,113		729,0	224	32,718
	147,3	368	35,959		759,2	120	33,953
	155,8	333	35,959		840,2	83	0,000
	187,2	290	36,268		887,2	960	26,854
	221,4	218	35,959		911,3	889	26,545
	238	162	36,576		933,8	827	26,699
	257,1	122	35,959		959,3	759	26,699
	269,9	86	36,268		990,0	706	12,964
	304,2	36	34,261		1031,0	788	13,272
	306,1	0	34,261		1081,1	720	13,272
	377,1	0	0,000		1092,0	673	22,995
	3	383,9	883		29,477	1102,7	527
398,2		862	28,706	1147,8	460	27,625	
417,7		837	20,217	1177,1	370	27,162	
434,2		808	31,947	1205,1	301	27,934	
450,3		775	32,718	1270,2	191	27,780	
465,4		741	34,570	1305,9	73	28,088	

**Tab. 2.110** Leistungsgeschichtedaten für die Proben des Brennelement BT03

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]	Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]
1	24,2	330	29,166		1067,4	122	29,774
	43,8		36,610		1080,2	86	30,078
	83,5		36,610		1115,4	36	27,951
	123,2		36,306		1117,3	0	27,799
	162,6		36,002		1188,3	0	0,000
	201,9		35,850	3	1199,2	883	19,140
	241,0		35,698		1213,3	862	18,836
	279,9		35,850		1238,6	837	10,178
	318,9		35,850		1250,8	808	21,267
	358,0		35,698		1267,1	775	21,571
	397,1		35,394		1282,2	741	23,090
	436,5		35,090		1320,3	684	21,723
	465,8		34,787		1351,2	611	22,178
	498,8		0,000		1382,6	545	22,178
	508,8		34,787		1414,1	478	22,178
	548,1		34,331		1457,3	368	22,482
	587,4		34,027		1482,3	291	0,000
	626,7		33,723		1542,3	224	22,634
	646,3		33,420		1570,3	120	24,457
	666,7		32,052		1651,3	83	0,000
697,5		22,634	4	1696,3	960	20,963	
730,3		18,685		1720,4	889	20,963	
811,3		0,000		1742,8	827	21,115	
2	818,5	654	20,204	1768,0	759	21,419	
	849,5	614	25,976	1799,0	706	10,178	
	865,9	563	28,862	1843,8	788	9,570	
	877,3	533	28,710	1891,9	720	10,633	
	889,9	507	28,710	1902,8	673	18,836	
	913,1	468	28,710	1913,4	527	22,634	
	935,8	418	28,710	1958,7	460	23,090	
	958,8	368	28,710	1987,4	370	22,938	
	967,0	333	28,558	2015,3	301	23,697	

Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]	Zyklus	Zeitschritte [d]	Borkonzentration [ppm]	Leistung [MW/tSM]
	998,0	290	29,318		2081,2	191	23,546
	1031,8	218	29,470		2117,3	73	23,849
	1048,3	162	30,078				

Die zeitliche Entwicklung der Probenleistung für alle Proben und der Borkonzentration sind in Tab. 2.108, Tab. 2.109 und Tab. 2.110 angegeben. Dabei ist zu beachten, dass für die Brennelemente D047 und BT03 jeweils nur ein Satz an Leistungsdichten angegeben ist. Diese Leistungsdichten müssen für die einzelnen Proben entsprechend des Abbrands skaliert werden. Für Zyklus 1 ist kein detaillierter zeitlicher Verlauf der Borkonzentration bekannt. Daher wurde für diesen Zyklus eine plausible mittlere Borkonzentration angenommen.

**Tab. 2.111** Für die Validierung herangezogener Datensatz von experimentell bestimmten Nuklidaten in g/tSMi

Stab	MKP109 (ATM-104)				MKP109 (ATM-104)		
	P	CC	LL		P	CC	LL
<sup>234</sup> U	1,36E+02	1,59E+02	1,82E+02	<sup>143</sup> Nd	8,66E+02	8,12E+02	6,95E+02
<sup>235</sup> U	4,02E+03	5,87E+03	9,61E+03	<sup>144</sup> Nd	1,86E+03	1,52E+03	1,07E+03
<sup>236</sup> U	4,19E+03	4,01E+03	3,56E+03	<sup>145</sup> Nd	8,44E+02	7,41E+02	5,79E+02
<sup>238</sup> U	9,36E+05	9,45E+05	9,56E+05	<sup>146</sup> Nd	9,42E+02	7,74E+02	5,56E+02
<sup>237</sup> Np	5,34E+02	4,05E+02	3,05E+02	<sup>148</sup> Nd	4,86E+02	4,07E+02	3,01E+02
<sup>238</sup> Pu	3,05E+02	2,15E+02	1,15E+02	<sup>150</sup> Nd	2,36E+02	1,95E+02	1,41E+02
<sup>239</sup> Pu	4,94E+03	4,94E+03	4,84E+03	<sup>147</sup> Sm	3,08E+02	2,70E+02	2,30E+02
<sup>240</sup> Pu	2,89E+03	2,54E+03	1,95E+03	<sup>148</sup> Sm	2,25E+02	1,61E+02	1,00E+02
<sup>241</sup> Pu	1,16E+03	1,02E+03	7,73E+02	<sup>149</sup> Sm	3,64E+02	2,90E+02	2,09E+02
<sup>242</sup> Pu	9,53E+02	6,54E+02	3,28E+02	<sup>150</sup> Sm	1,07E+01	9,41E+00	7,52E+00
<sup>241</sup> Am	4,33E+02	3,90E+02	2,83E+02	<sup>151</sup> Sm	1,33E+02	1,10E+02	8,97E+01
<sup>79</sup> Se	4,79E+00	4,46E+00	3,36E+00	<sup>152</sup> Sm	5,64E+01	3,81E+01	3,07E+01
<sup>90</sup> Sr	5,43E+02	4,86E+02	3,78E+02	<sup>153</sup> Eu	1,61E+02	1,29E+02	8,52E+01
<sup>99</sup> Tc	8,94E+02	8,15E+02	6,35E+02	<sup>154</sup> Eu	1,18E+01	8,78E+00	6,08E+00
<sup>126</sup> Sn	2,02E+01	1,67E+01	1,15E+01	<sup>155</sup> Eu	1,82E+00	1,39E+00	1,04E+00
<sup>133</sup> Cs	1,41E+03	1,24E+03	9,64E+02	<sup>154</sup> Gd	2,00E+01	1,50E+01	1,37E+01
<sup>134</sup> Cs	3,40E+01	2,27E+01	1,13E+01	<sup>155</sup> Gd	9,96E+00	7,41E+00	6,25E+00
<sup>135</sup> Cs	4,87E+02	4,52E+02	4,10E+02	<sup>156</sup> Gd	9,53E+01	7,33E+01	6,36E+01
<sup>137</sup> Cs	1,42E+03	1,18E+03	8,77E+02	<sup>158</sup> Gd	2,07E+01	1,49E+01	1,39E+01
<sup>129</sup> I	2,41E+02	2,18E+02	1,35E+02	<sup>160</sup> Gd			1,45E+00

**Tab. 2.112** Für die Validierung herangezogener Datensatz von experimentell bestimmten Nuklidaten in g/tSMi

<b>Stab</b>	<b>MLA098 (ATM-103)</b>		
<b>Probe</b>	<b>P</b>	<b>BB</b>	<b>JJ</b>
<sup>234</sup> U	1,36E+02	1,37E+02	1,59E+02
<sup>235</sup> U	5,42E+03	7,87E+03	1,16E+04
<sup>236</sup> U	3,70E+03	3,39E+03	2,84E+03
<sup>238</sup> U	9,55E+05	9,69E+05	9,70E+05
<sup>237</sup> Np	3,89E+02	3,40E+02	1,98E+02
<sup>238</sup> Pu	1,68E+02	1,10E+02	5,50E+01
<sup>239</sup> Pu	4,75E+03	4,82E+03	4,49E+03
<sup>240</sup> Pu	2,40E+03	2,00E+03	1,41E+03
<sup>241</sup> Pu	9,22E+02	7,74E+02	5,15E+02
<sup>242</sup> Pu	6,21E+02	3,75E+02	1,58E+02
<sup>241</sup> Am	3,97E+02	3,28E+02	2,21E+02
<sup>79</sup> Se	4,65E+00	3,85E+00	2,88E+00
<sup>90</sup> Sr	4,30E+02	3,62E+02	2,76E+02
<sup>99</sup> Tc	7,49E+02	6,21E+02	4,68E+02
<sup>126</sup> Sn	1,55E+01	1,25E+01	7,90E+00
<sup>135</sup> Cs	3,27E+02	3,07E+02	2,75E+02
<sup>137</sup> Cs	1,05E+03	8,53E+02	6,00E+02

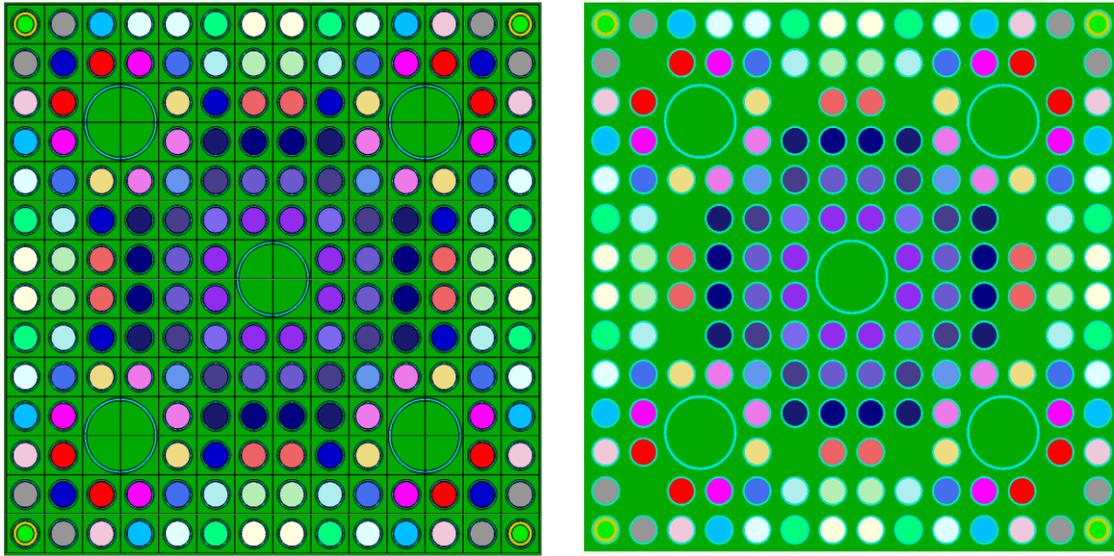
**Tab. 2.113** Für die Validierung herangezogener Datensatz von experimentell bestimmten Nuklidkonzentrationen in g/tSMi

Stab	NBD107 (ATM-106)			Probe	GG
	Q	GG	MM		
<sup>234</sup> U	8,497E+01	1,441E+02	1,736E+02	<sup>143</sup> Nd	7,189E+02
<sup>235</sup> U	1,595E+03	3,074E+03	4,379E+03	<sup>144</sup> Nd	1,603E+03
<sup>236</sup> U	3,449E+03	3,437E+03	3,244E+03	<sup>145</sup> Nd	7,246E+02
<sup>238</sup> U	9,384E+05	9,572E+05	9,581E+05	<sup>146</sup> Nd	7,805E+02
<sup>237</sup> Np	4,290E+02	3,645E+02	2,967E+02	<sup>148</sup> Nd	4,124E+02
<sup>238</sup> Pu	3,224E+02	2,209E+02	1,618E+02	<sup>147</sup> Sm	2,659E+02
<sup>239</sup> Pu	4,272E+03	4,351E+03	4,327E+03	<sup>148</sup> Sm	1,713E+02
<sup>240</sup> Pu	2,948E+03	2,633E+03	2,345E+03	<sup>150</sup> Sm	3,000E+02
<sup>241</sup> Pu	1,005E+03	9,223E+02	8,236E+02	<sup>151</sup> Sm	7,970E+00
<sup>242</sup> Pu	1,326E+03	8,795E+02	6,197E+02	<sup>152</sup> Sm	1,210E+02
<sup>241</sup> Am	7,207E+02	4,827E+02	3,901E+02	<sup>154</sup> Sm	4,470E+01
<sup>79</sup> Se	4,425E+00	4,159E+00	3,088E+00	<sup>153</sup> Eu	1,483E+02
<sup>90</sup> Sr	4,980E+02	4,271E+02	3,826E+02	<sup>154</sup> Eu	7,074E+00
<sup>99</sup> Tc	7,221E+02	5,936E+02	5,101E+02	<sup>155</sup> Eu	1,138E+00
<sup>126</sup> Sn	1,930E+01	1,470E+01	1,296E+01		
<sup>135</sup> Cs	4,716E+02	4,086E+02	3,978E+02		
<sup>137</sup> Cs	1,464E+03	1,119E+03	9,761E+02		

In Tab. 2.111, Tab. 2.112 und Tab. 2.113 sind die für die Validierung verwendeten gemessenen Nuklidkonzentrationen angegeben. Die Messdaten stammen in erster Linie vom Pacific Northwest National Laboratory (PNL). Für die drei Proben des Stabs MKP109 sowie die die Probe GG des Stabs NBD107 wurden zusätzliche Messungen vom Los Alamos National Laboratory (LANL) und dem Khlopin Radium Institut (KRI) durchgeführt. Die jeweiligen Besonderheiten dieser Messungen werden in /RAD 10/ diskutiert und die verschiedenen Messungen zu einem einheitlichen Datensatz zusammengefasst. In der vorliegenden Arbeit wird diesem Ansatz gefolgt und die Daten wurden entsprechend übernommen. Einzelne in /RAD 10/ als nicht fehlerbehaftet gekennzeichnete Werte wurden für die Validierung von MOTIVE nicht übernommen.

## 2.7.2 Modellierung

Für die Modellierung der Brennelemente wurden die einzelnen Brennstäbe eines Brennelements so modelliert, dass abgesehen von symmetriebedingt äquivalenten Stäben alle Stäbe einzeln abgebrannt und verfolgt werden. Dies bedeutet, dass 33 unterschiedliche Stabsorten betrachtet wurden. Die geometrische Modellierung ist in Abb. 2.48 anhand des Beispiels des Brennelements BT03 gezeigt. Für die Proben des



**Abb. 2.48** KENO-VI Modell des Calvert Cliffs Brennelements BT03. Links Brennelement mit abbrennbaren Absorberstäben, rechts mit gezogenen Absorberstäben

Stabs MKP09 wurde die brennelementgemittelte Leistung bei Probennachrechnung so angepasst, dass die Konzentration von  $^{148}\text{Nd}$  als Abbrandindikator möglichst exakt der gemessenen entspricht. Bei den Proben des Stabs MLA098, bei denen keine Daten für  $^{148}\text{Nd}$  vorliegen, wurde eine Anpassung an den Abbrandindikator  $^{137}\text{Cs}$  vorgenommen. Bei den Proben des Stabs NBD107 liegt nur für die Probe GG eine Messung für  $^{148}\text{Nd}$  vor. Für die anderen beiden Proben wurde der Nominalabbrand beibehalten. Auf eine Anpassung an  $^{137}\text{Cs}$  wurde nicht vorgenommen, da einerseits die berechneten  $^{137}\text{Cs}$  Konzentrationen bereits im Rahmen der Messgenauigkeit ( $2\sigma$  der angegebenen Messunsicherheit) mit den gemessenen Werten übereinstimmen und andererseits bei einer Anpassung der Wert für  $^{235}\text{U}$  auf eine größere Abweichung vom tatsächlichen Abbrandwert hindeutete).

### 2.7.3 Resultate

Die Ergebnisse der Nachrechnungen sind in Tab. 2.114 – Tab. 2.116 sowie in Form von Balkendiagrammen in Abb. 2.49 – Abb. 2.51 gezeigt. Die Ergebnisse von allen drei Brennelementen zeigen gute Übereinstimmungen bei den Uran- und Plutonium-Nukliden, wobei jeweils ein leichter Trend zu größerer Unterschätzung der  $^{239}\text{Pu}$ -Konzentration zu erkennen ist, je weiter unten die Probe im Brennstab entnommen wurde. Als weitere Aktinoiden wurden  $^{237}\text{Np}$  und  $^{241}\text{Am}$  gemessen. Die Übereinstimmung für diese Nuklide liegt im Bereich anderer Nachrechnungen, bei den Proben aus dem Brennelement D101 sogar deutlich besser. Die Übereinstimmungen zwischen Rechnung und Experiment für die Spaltprodukte sind größtenteils gut, größere Abweichungen gibt es für die Gadolinium-Nuklide beim Brennelement D047 und für  $^{99}\text{Tc}$  beim Brennelement BT03.

**Tab. 2.114** Abweichung zwischen Rechnung (C) und Experiment (E) als Werte C/E-1 in Prozent für den Stab MLA098

Stab	MLA098 (ATM-103)		
Probe	P	BB	JJ
$^{234}\text{U}$	4,6	14,6	11,7
$^{235}\text{U}$	-0,1	-4,5	-3,4
$^{236}\text{U}$	-4,8	-4,1	-4,6
$^{238}\text{U}$	-0,9	-1,8	-1,1
$^{237}\text{Np}$	2,6	-9,2	-0,9
$^{238}\text{Pu}$	5,2	0,9	-10,8
$^{239}\text{Pu}$	2,0	-2,1	-4,2
$^{240}\text{Pu}$	2,1	2,5	-1,1
$^{241}\text{Pu}$	0,4	-2,2	-4,9
$^{242}\text{Pu}$	-0,6	3,2	1,5
$^{241}\text{Am}$	-3,0	-2,4	-5,0
$^{79}\text{Se}$	-1,4	0,1	-1,9
$^{90}\text{Sr}$	-8,6	-6,9	-7,2
$^{99}\text{Tc}$	7,1	7,9	4,2
$^{126}\text{Sn}$	40,0	34,2	37,0
$^{135}\text{Cs}$	5,0	4,1	2,9
$^{137}\text{Cs}$	0,1	0,1	0,1

**Tab. 2.115** Abweichung zwischen Rechnung (C) und Experiment (E) als Werte C/E-1  
in Prozent für den Stab MKP109

Stab	MKP109 (ATM-104)				MKP109 (ATM-104)		
	P	CC	LL		P	CC	LL
<sup>234</sup> U	3,2	-2,2	-1,5	<sup>143</sup> Nd	0,6	-0,2	-0,6
<sup>235</sup> U	0,5	-1,1	-2,3	<sup>144</sup> Nd	-2,4	-1,8	-1,1
<sup>236</sup> U	-0,6	-0,6	-1,3	<sup>145</sup> Nd	-1,5	-1,4	-1,0
<sup>238</sup> U	0,0	-0,3	-0,5	<sup>146</sup> Nd	-0,9	-0,8	-0,4
<sup>237</sup> Np	-0,5	8,2	0,3	<sup>148</sup> Nd	0,0	0,1	0,1
<sup>238</sup> Pu	0,9	-1,3	-5,2	<sup>150</sup> Nd	2,5	2,0	1,0
<sup>239</sup> Pu	-0,7	-2,0	-3,2	<sup>147</sup> Sm	-5,8	2,9	5,0
<sup>240</sup> Pu	-1,7	-1,8	-3,9	<sup>148</sup> Sm	-5,8	-0,6	-1,8
<sup>241</sup> Pu	-2,9	-3,8	-5,2	<sup>149</sup> Sm	2,4	6,3	5,4
<sup>242</sup> Pu	-3,6	-1,9	-3,8	<sup>150</sup> Sm	-7,1	-3,9	10,0
<sup>241</sup> Am	-12,2	-13,7	-9,7	<sup>151</sup> Sm	-3,4	6,2	4,7
<sup>79</sup> Se	19,3	11,6	14,5	<sup>152</sup> Sm	-5,5	9,2	-11,3
<sup>90</sup> Sr	-8,4	-9,5	-7,2	<sup>153</sup> Eu	-4,5	-1,2	3,5
<sup>99</sup> Tc	12,0	6,4	4,6	<sup>154</sup> Eu	2,8	8,0	7,5
<sup>126</sup> Sn	42,0	37,9	37,0	<sup>155</sup> Eu	2,6	5,9	6,5
<sup>133</sup> Cs	0,8	0,2	-0,5	<sup>154</sup> Gd	34,8	39,6	-11,4
<sup>134</sup> Cs	-13,8	-6,6	5,3	<sup>155</sup> Gd	2,5	8,4	-22,8
<sup>135</sup> Cs	1,4	2,1	1,4	<sup>156</sup> Gd	72,0	44,2	-21,2
<sup>137</sup> Cs	-3,3	-1,6	-2,5	<sup>158</sup> Gd	41,0	34,2	-21,6
<sup>129</sup> I	-13,6	-21,5	-10,3	<sup>160</sup> Gd	-	-	-48,2

**Tab. 2.116** Abweichung zwischen Rechnung (C) und Experiment (E) als Werte C/E-1  
in Prozent für den Stab NBD107

<b>Stab</b>	<b>NBD107 (ATM-106)</b>				
<b>Probe</b>	<b>Q</b>	<b>GG</b>	<b>MM</b>	<b>Probe</b>	<b>GG</b>
<sup>234</sup> U	28,6	-14,5	-23,4	<sup>143</sup> Nd	-1,6
<sup>235</sup> U	-4,8	-6,4	-4,8	<sup>144</sup> Nd	-2,1
<sup>236</sup> U	0,0	-0,9	1,5	<sup>145</sup> Nd	-1,4
<sup>238</sup> U	-0,2	-1,2	-0,7	<sup>146</sup> Nd	-0,3
<sup>237</sup> Np	16,5	11,2	15,2	<sup>148</sup> Nd	0,0
<sup>238</sup> Pu	7,5	5,5	5,9	<sup>147</sup> Sm	2,2
<sup>239</sup> Pu	-4,7	-6,6	-7,5	<sup>148</sup> Sm	-2,5
<sup>240</sup> Pu	-1,4	-2,2	-2,0	<sup>150</sup> Sm	1,6
<sup>241</sup> Pu	-5,7	-8,8	-9,0	<sup>151</sup> Sm	-9,9
<sup>242</sup> Pu	-3,5	-4,5	-2,6	<sup>152</sup> Sm	2,0
<sup>241</sup> Am	-41,2	-19,2	-8,9	<sup>154</sup> Sm	1,1
<sup>79</sup> Se	29,8	16,5	38,2	<sup>153</sup> Eu	-10,6
<sup>90</sup> Sr	-7,9	-7,7	-7,8	<sup>154</sup> Eu	1,2
<sup>99</sup> Tc	44,0	46,0	48,3	<sup>155</sup> Eu	-9,1
<sup>126</sup> Sn	69,6	68,1	56,1		
<sup>135</sup> Cs	-5,0	0,4	-1,5		
<sup>137</sup> Cs	-4,5	-0,5	-2,9		

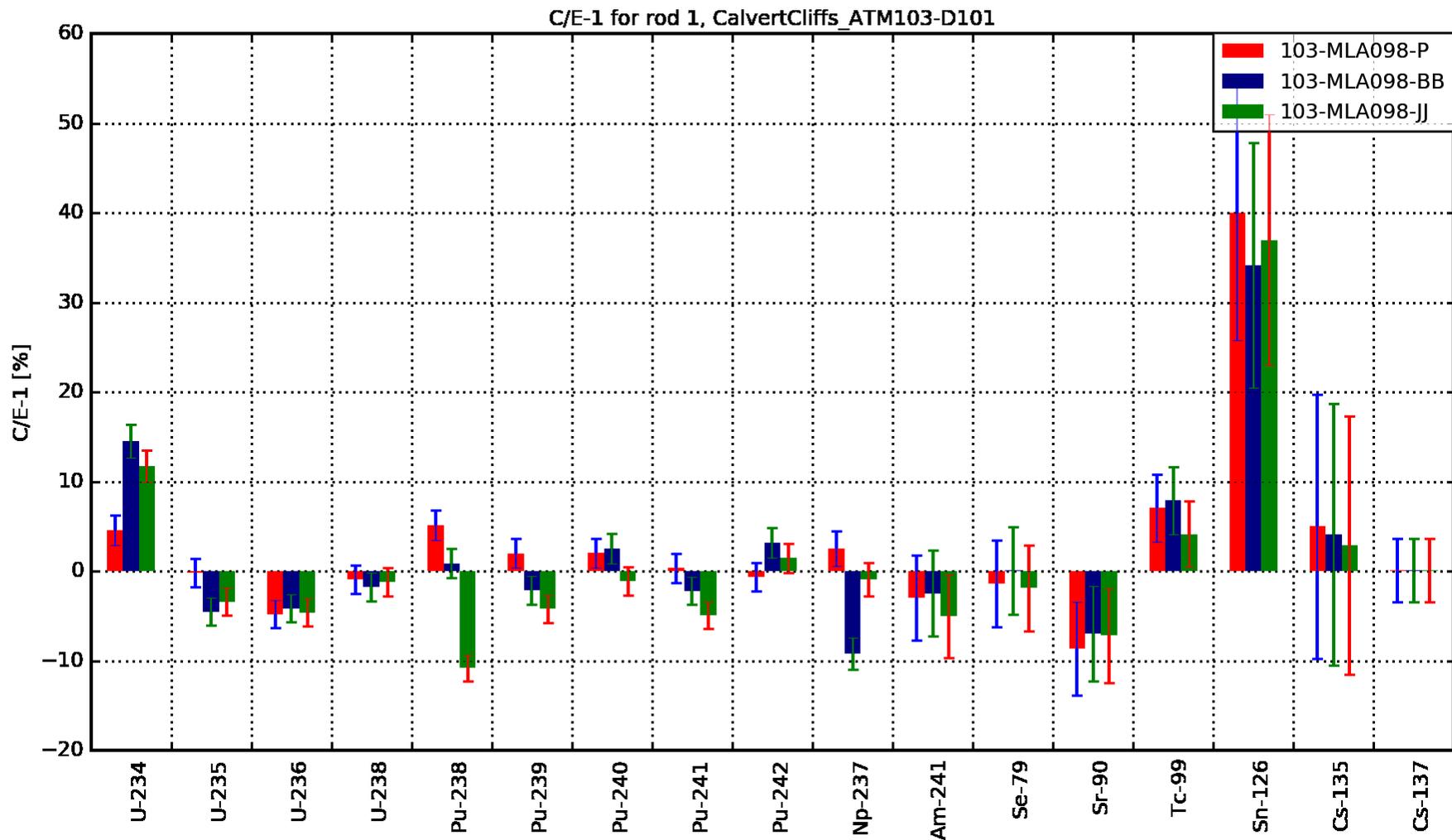


Abb. 2.49 Nachrechnungsergebnisse in der Form C/E-1 in Prozent für die Proben des Brennelements D101

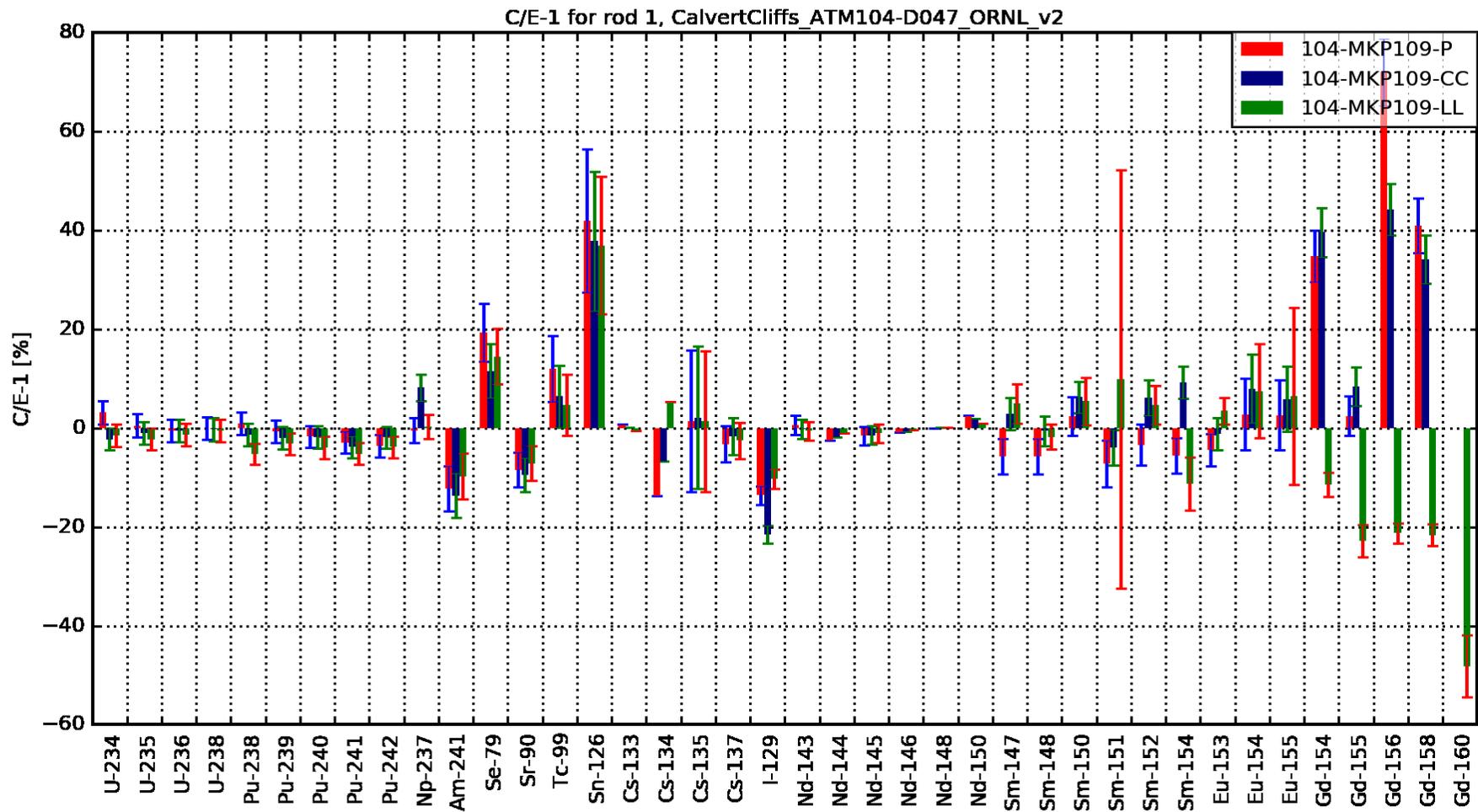


Abb. 2.50 Nachrechnungsergebnisse in der Form C/E-1 in Prozent für die Proben des Brennelements D047

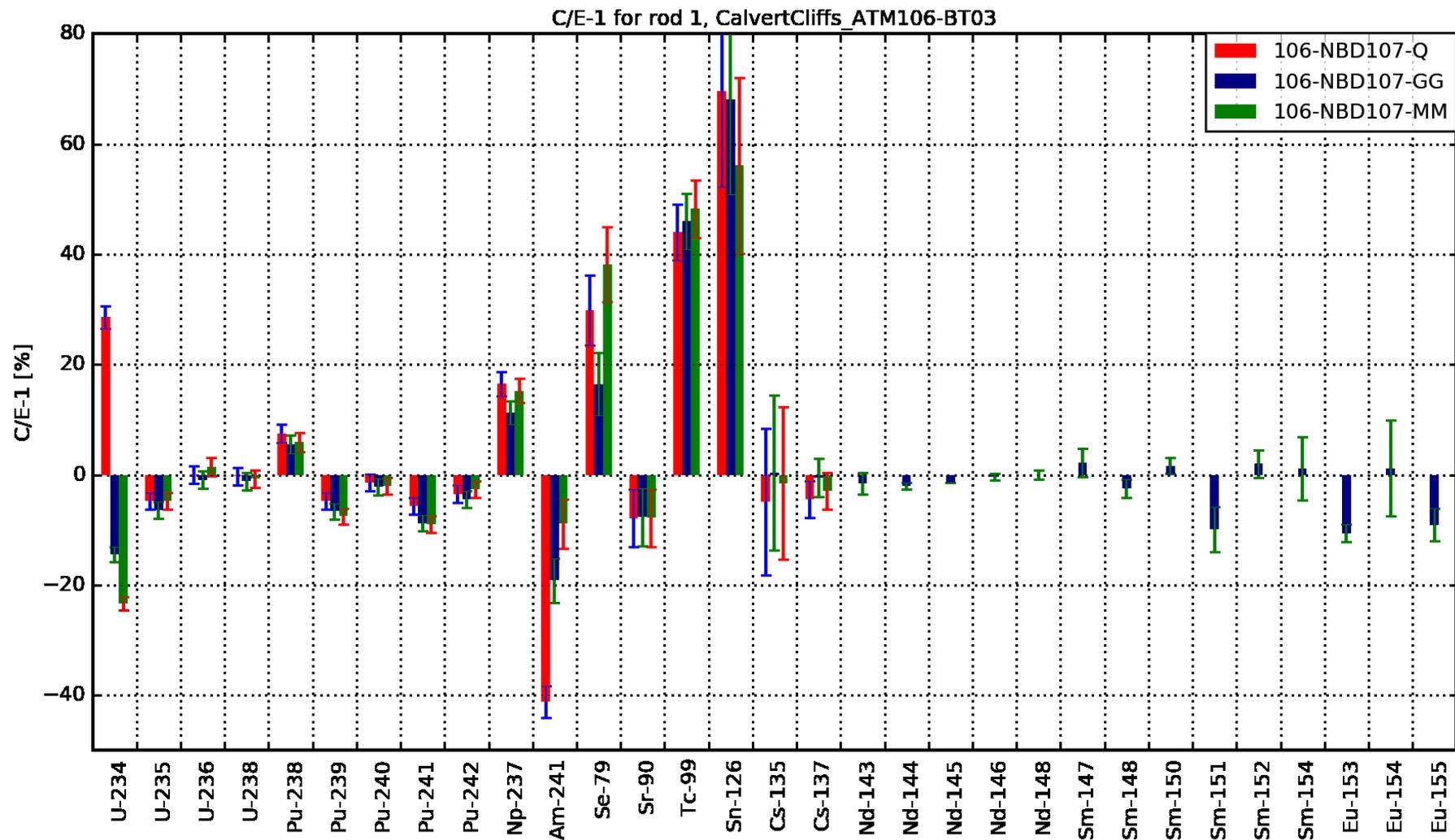


Abb. 2.51 Nachrechnungsergebnisse in der Form C/E-1 in Prozent für die Proben des Brennelements BT03

Einen Sonderfall stellen die Nuklide  $^{79}\text{Se}$  und  $^{126}\text{Sn}$  dar. Hierbei handelt es sich um langlebige Spaltprodukte, die insbesondere für den Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern relevant sind. Wie auch bei einigen anderen Nukliden wurden hier nicht die Massen, sondern die Aktivitäten gemessen und daraus unter Verwendung der Halbwertszeiten auf die jeweilige Nuklidkonzentration geschlossen. Allerdings ist bei diesen Nukliden der Wert der Halbwertszeiten mit großen Unsicherheiten behaftet. Es wurden in der Vergangenheit sehr unterschiedliche Werte gemessen /JÖR 10/, /BIE 09/. Die in der SFCOMPO zur Umrechnung verwendeten Halbwertszeiten sind dort nicht direkt angegeben, können jedoch aus den vorhandenen Daten rückgeschlossen werden. Für  $^{126}\text{Sn}$  ergibt sich so eine Halbwertszeit von  $2,3\text{E}+05$  Jahren und für  $^{79}\text{Se}$  eine Halbwertszeit von  $3,35\text{E}+05$  Jahren. Der Wert für  $^{126}\text{Sn}$  stammt aus der ENDF/B-VII.1-Evaluation, der Wert für  $^{79}\text{Se}$  scheint ein Mittelwert der Daten aus JEFF und ENDF/B zu sein. Je nachdem welche Evaluation oder welcher experimentelle Wert für die Halbwertszeiten für die Umrechnung verwendet wird, kann den Vergleich zwischen Rechnung und Experiment wesentlich beeinflussen. Eine nähere Untersuchung hierzu steht noch aus. Eine mögliche Option ist hier auch der direkte Vergleich der berechneten und gemessenen Aktivitäten. Dann geht nur noch die im Rechenverfahren, hier also in MOTIVE, verwendete Halbwertszeit ein.

### **3 Nachrechnungen von SWR-Proben**

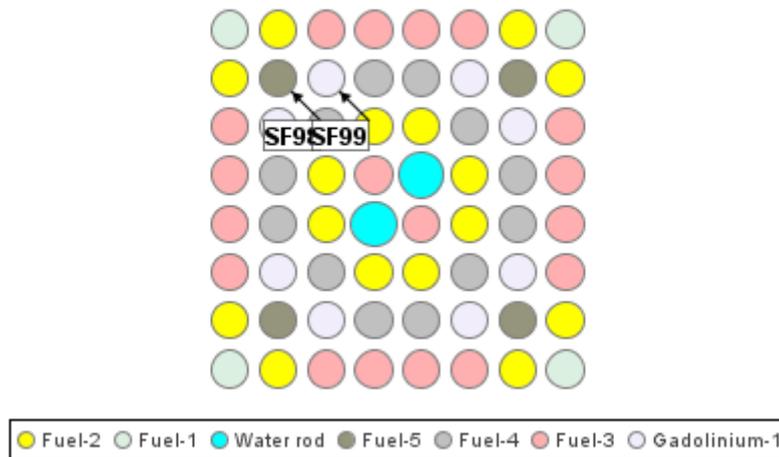
#### **3.1 Proben des Reaktors Fukushima-Daini-2**

Aus dem Siedewasserreaktor Fukushima-Daini-2, der von der japanischen Tokyo Electric Power Company (TEPCO) betrieben wird, wurden insgesamt 18 Nachbestrahlungsanalyseproben aus den zwei Brennstäben SF98 und SF99 des Brennelements (BE) 2F2DN23 nachgerechnet. Das Brennelement wurde in der Periode vom 14.01.1989 bis zum 16.11.1992 über drei Zyklen für insgesamt 1.174 Tage bestrahlt. Dabei wurden Probenabbrände von 4,15 bis 43,99 GWd/tSM erreicht. Die Angaben zu Brennelementgeometrien, Materialdaten und Abbrandhistorien stammen vorwiegend aus der Datenbank SFCOMPO /MIC 17/ und wurden teilweise aus der Veröffentlichung /MER 10/ ergänzt.

##### **3.1.1 Experimentelle Daten**

Bei dem Brennelement 2F2DN23 handelt es sich um ein 8 x 8 SWR-Brennelement mit zwei zentralen, diagonal versetzten Wasserrohren. Das Brennelement enthält neben fünf verschiedenen Anreicherungen acht Brennstäbe mit dem abbrennbaren Neutronenabsorber  $Gd_2O_3$ . Der Probenstab SF98 ist ein normaler Brennstab, der Stab SF99 ein Gadolinium-haltiger Brennstab. In Abb. 3.1 ist die schematische Darstellung des Brennelements mit den unterschiedlichen Brennstäben farblich kodiert dargestellt. Das Brennelement ist diagonalsymmetrisch. Das Steuerstabkreuz wird in Abb. 3.1 links und oben eingefahren. Zusätzlich wird das Brennelement von einem Wasserkasten umgeben.

### Assembly 2F2DN23



**Abb. 3.1** Schematische Darstellung des Brennelements aus Fukushima-Daini-2 /MIC 17/

In Tab. 3.1 sind die relevanten geometrischen Abmessungen des Brennelements wiedergegeben, in Tab. 3.2 die relevanten geometrischen Abmessungen der Brennstäbe und Wasserrohre.

**Tab. 3.1** Geometrische Abmessungen des Brennelements 2F2DN23 /MIC 17/, /MER 10/

Parameter	
Gittertyp	8 x 8
Brennstababstand [cm]	1,63
Brennelementabstand [cm]	15,2
Brennstablänge [cm]	406,6
Aktive Brennstablänge [cm]	371,0
Anzahl Brennelemente	62
Anzahl Wasserrohre	1
Durchmesser Wasserkasten innen [cm]	13,4
Durchmesser Wasserkasten außen [cm]	13,806

**Tab. 3.2** Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre /MIC 17/, /MER 10/

Parameter	
Durchmesser Brennstoff [cm]	1,03
Durchmesser innen Hüllrohr [cm]	1,058
Durchmesser außen Hüllrohr [cm]	1,23
Material Hüllrohr	Zircaloy-2
Durchmesser innen Wasserrohre [cm]	1,35
Durchmesser außen Wasserrohre [cm]	1,50
Material Führungs- und Instrumentalrohre	Zircaloy-2

Aus dem Brennelement 2F2DN23 wurden aus Brennstab SF98 die Proben SF98-1 bis SF98-8 und aus Brennstab SF99 die Proben SF99-1 bis SF99-10 entnommen. Weiter Details der 18 Proben aus den beiden Brennstäben finden sich in Tab. 3.3 und Tab. 3.4.

Details zur Brennstoffzusammensetzung wurden auch /MIC 17/ entnommen. Die allgemeinen Werte und die nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der UO<sub>2</sub> Brennstäben sind in Tab. 3.5, die der zwei Abschnitte der UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Brennstäbe in Tab. 3.6. Alle Brennstäbe besitzen eine Dichte von 95 % der theoretischen Dichte: 10,412 g/cm<sup>3</sup>. Die angegebenen Gew-% wurden für die Rechnung unter Berücksichtigung der Dichte des Brennstoffs in Kernzahldichten umgerechnet.

**Tab. 3.3** Relevante Details der acht Proben aus Brennstab SF98

Parameter	01	02	03	04	05	06	07	08
Probenabbrand [GWd/tSM]	4,15	26,51	36,94	42,35	43,99	39,92	39,41	27,18
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	3,9	16,7	42,3	69,2	121,4	205,0	275,7	339,7
Dampfblasengehalt [%]	0,0	0,0	3,0	11,0	32,0	54,5	68,0	73,0
Moderatordichte [kg/m <sup>3</sup> ]	740,19	740,19	719,08	662,79	515,02	356,70	261,71	226,52

**Tab. 3.4** Relevante Details der zehn Proben aus Brennstab SF99

Parameter	01	02	03	04	05
Probenabbrand [GWd/tSM]	7,53	22,63	32,44	35,42	37,41
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	13,4	28,6	50,2	68,6	118,9
Dampfblasengehalt [%]	0,0	1,4	5,8	10,8	27,7
Moderatordichte [kg/m <sup>3</sup> ]	740,19	730,34	699,38	664,20	545,28
Parameter	06	07	08	09	10
Probenabbrand [GWd/tSM]	32,36	32,13	21,83	16,65	7,19
Probenhöhe von der aktiven Höhe [cm]	206,1	274,4	338,8	354,0	367,6
Dampfblasengehalt [%]	54,7	66,5	71,7	72,9	74,3
Moderatordichte [kg/m <sup>3</sup> ]	355,29	272,26	235,67	227,23	217,38

**Tab. 3.5** Daten zur Materialzusammensetzung des UO<sub>2</sub> Brennstoffs

Parameter	U <sub>nat</sub>	Fuel 1	Fuel 2	Fuel 3	Fuel 4	Fuel 5
<sup>234</sup> U [Gew%]	0,006	0,018	0,026	0,03	0,031	0,035
<sup>235</sup> U [Gew%]	0,71	1,997	2,903	3,405	3,448	3,91
<sup>236</sup> U [Gew%]	0,003	0,008	0,013	0,016	0,016	0,018
<sup>238</sup> U [Gew%]	99,281	97,976	97,058	96,549	96,505	96,037
<sup>234</sup> U [KZD]	1,4172E-06	4,2515E-06	6,1410E-06	7,0857E-06	7,3218E-06	8,2665E-06
<sup>235</sup> U [KZD]	1,6699E-04	4,6967E-04	6,8274E-04	8,0080E-04	8,1091E-04	9,1956E-04
<sup>236</sup> U [KZD]	7,0259E-07	2,1077E-06	3,0445E-06	3,7470E-06	3,7470E-06	4,2153E-06
<sup>238</sup> U [KZD]	2,3056E-02	2,2752E-02	2,2539E-02	2,2421E-02	2,2410E-02	2,2301E-02
<sup>16</sup> O	4,6450E-02	4,6457E-02	4,6461E-02	4,6464E-02	4,6464E-02	4,6467E-02

**Tab. 3.6** Daten zur Materialzusammensetzung des Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Brennstoffs /MIC 17/

<b>Isotop</b>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oben	
	[Gew%]	Kernzahldichten	[Gew%]	Kernzahldichten
<sup>234</sup> U	0,030	6,7668E-06	0,030	6,8731E-06
<sup>235</sup> U	3,410	7,6589E-04	3,410	7,7792E-04
<sup>236</sup> U	0,016	3,5784E-06	0,016	3,6346E-06
<sup>238</sup> U	96,544	2,1410E-02	96,544	2,1747E-02
natGd	4,5	-	3,0	-
<sup>152</sup> Gd	0,19	3,0602E-06	0,19	2,0402E-06
<sup>154</sup> Gd	2,13	3,3861E-05	2,13	2,2574E-05
<sup>155</sup> Gd	14,58	2,3029E-04	14,58	1,5353E-04
<sup>156</sup> Gd	20,3	3,1858E-04	20,3	2,1239E-04
<sup>157</sup> Gd	15,62	2,4357E-04	15,62	1,6238E-04
<sup>158</sup> Gd	24,95	3,8660E-04	24,95	2,5773E-04
<sup>160</sup> Gd	22,23	3,4015E-04	22,23	2,2676E-04
<sup>16</sup> O		4,6707E-02		4,6626E-02

Nach /MIC 17/ bestehen alle Strukturmaterialien aus Zirkaloy-4. Hierfür wurden die Kernzahldichten mit der angegebenen Dichte und der natürlichen Isotopen-Zusammensetzung (aus /MAG 18/) berechnet. Die verwendeten Werte sind in Tab. 3.7 wiedergegeben.

**Tab. 3.7** Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-2

Element	[wt.-%]	Isotope	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]	Element	[wt.-%]	Isotope	Kernzahl-dichte [1/barn*cm]
Zr	98,23	<sup>90</sup> Zr	2,1778E-02	Fe	0,21	<sup>54</sup> Fe	8,8154E-06
		<sup>91</sup> Zr	4,6971E-03			<sup>56</sup> Fe	1,3344E-04
		<sup>92</sup> Zr	7,1016E-03			<sup>57</sup> Fe	3,0277E-06
		<sup>94</sup> Zr	7,0437E-03			<sup>58</sup> Fe	3,9598E-07
		<sup>96</sup> Zr	1,1111E-03			Cr	0,1
Sn	1,45	<sup>112</sup> Sn	4,8703E-06	<sup>52</sup> Cr	6,2491E-05		
		<sup>114</sup> Sn	3,2557E-06	<sup>53</sup> Cr	6,9523E-06		
		<sup>115</sup> Sn	1,6626E-06	<sup>54</sup> Cr	1,6985E-06		
		<sup>116</sup> Sn	7,0487E-05	Hf	0,01		
		<sup>117</sup> Sn	3,6913E-05			<sup>176</sup> Hf	1,1591E-07
		<sup>118</sup> Sn	1,1542E-04			<sup>177</sup> Hf	4,0754E-07
		<sup>119</sup> Sn	4,0593E-05			<sup>178</sup> Hf	5,9437E-07
		<sup>120</sup> Sn	1,5268E-04			<sup>179</sup> Hf	2,9509E-07
		<sup>122</sup> Sn	2,1341E-05			<sup>180</sup> Hf	7,5582E-07
<sup>124</sup> Sn	2,6258E-05						

/MIC 17/ gibt die Bestrahlungsgeschichte in Form von spezifischer Leistung an. Während die Leistung für 17 Zeitpunkte in den drei bestrahlten Zyklen angegeben ist, wird für den Dampfblasengehalt für jede Probe nur ein Wert angegeben, der in Tab. 3.3 und Tab. 3.4 wiedergegeben ist. Die verwendeten Leistungswerte für die Proben aus dem Brennstab SF98 sind in Tab. 3.8 wiedergegeben, die für Brennstab SF99 in Tab. 2.9. Dabei ist in der letzten Spalte die Zeit in Tagen zwischen Reaktorabschaltung und Messdatum der jeweiligen Probe angegeben.

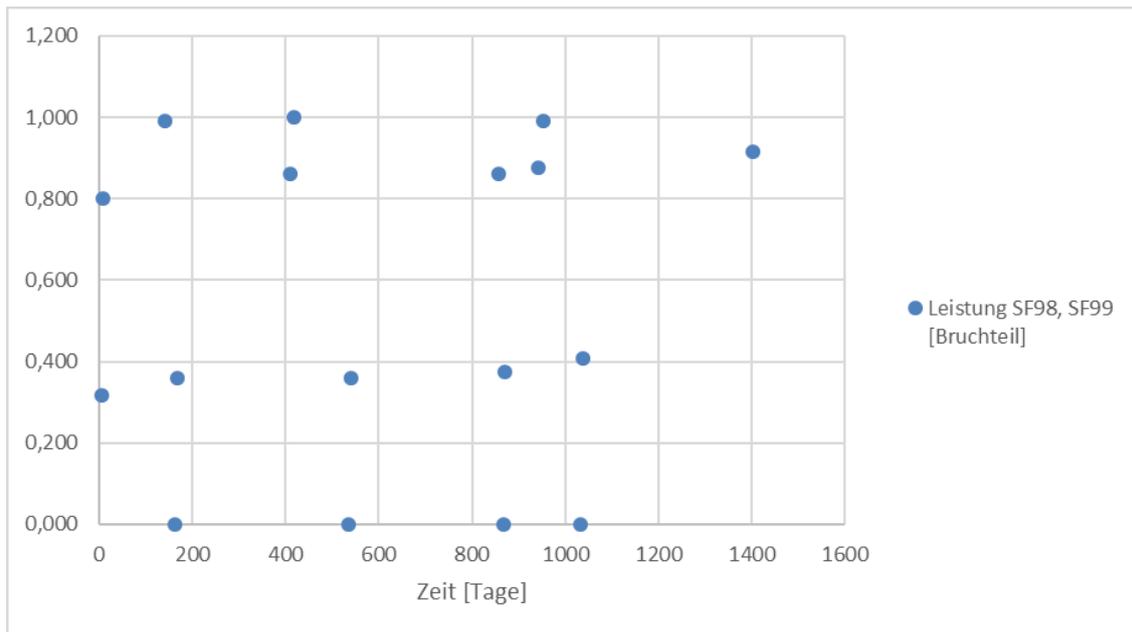
**Tab. 3.8** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 bis 7 für die Proben aus dem Brennstab SF98

Zyklus	Zeitschritte [d]	Leistung [MW/tSM]							
		SF98-01	SF98-02	SF98-03	SF98-04	SF98-05	SF98-06	SF98-07	SF98-08
5	6	1,27	8,10	11,29	12,95	13,45	12,21	12,05	8,31
	3	3,20	20,46	28,50	32,68	33,95	30,81	30,41	20,98
	132	3,95	25,22	35,14	40,29	41,84	37,98	37,49	25,86
	21	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	1,43	9,13	12,73	14,59	15,16	13,76	13,58	9,37
	244	3,44	22,00	30,65	35,15	36,51	33,13	32,70	22,56
	8	3,99	25,47	35,49	40,70	42,27	38,36	37,87	26,12
Revision	117	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5	1,43	9,13	12,73	14,59	15,16	13,76	13,58	9,37
	317	3,44	22,00	30,65	35,15	36,51	33,13	32,70	22,56
	9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,49	9,52	13,27	15,21	15,80	14,34	14,15	9,76
	72	3,50	22,38	31,19	35,76	37,15	33,71	33,28	22,95
	10	3,95	25,22	35,14	40,29	41,84	37,98	37,49	25,86
Revision	81	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	1,63	10,42	14,52	16,65	17,29	15,69	15,49	10,69
	365	3,65	23,29	32,45	37,20	38,64	35,07	34,62	23,88
Lagerung [d]		2008,8	2008,8	2008,8	2008,8	2154,9	2264,5	2154,9	2154,9

**Tab. 3.9** Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 bis 7 für die Proben aus dem Brennstab SF99

Zyklus	Zeitschritte [d]	Leistung [MW/tSM]									
		SF99-01	SF99-02	SF99-03	SF99-04	SF99-05	SF99-06	SF99-07	SF99-08	SF99-09	SF99-10
5	6	2,3	6,92	9,92	10,83	11,44	9,89	9,82	6,67	5,09	2,2
	3	5,81	17,46	25,03	27,33	28,87	24,97	24,79	16,84	12,85	5,55
	132	7,16	21,53	30,86	33,69	35,58	30,78	30,56	20,76	15,84	6,84
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	2,59	7,8	11,18	12,21	12,89	11,15	11,07	7,52	5,74	2,48
	244	6,25	18,78	26,92	29,4	31,05	26,85	26,66	18,12	13,82	5,97
	8	7,23	21,75	31,17	34,04	35,95	31,09	30,87	20,98	16	6,91
Revi- sion	117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5	2,59	7,8	11,18	12,21	12,89	11,15	11,07	7,52	5,74	2,48
	317	6,25	18,78	26,92	29,4	31,05	26,85	26,66	18,12	13,82	5,97
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,7	8,13	11,65	12,72	13,44	11,62	11,54	7,84	5,98	2,58
	72	6,35	19,11	27,39	29,91	31,59	27,33	27,13	18,43	14,06	6,08
	10	7,16	21,53	30,86	33,69	35,58	30,78	30,56	20,76	15,84	6,84
Revi- sion	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	2,96	8,9	12,75	13,92	14,71	12,72	12,63	8,58	6,54	2,83
	365	6,61	19,88	28,5	31,11	32,86	28,42	28,22	19,17	14,62	6,32
Lagerung [d]		2447,1	2445	2447,1	2445	2447,1	2445	2447,1	2374,1	2447,1	2445

Während die individuellen Leistungen unterschiedlich sind, ist die zeitliche Entwicklung der Leistung relativ zu der jeweiligen Maximalleistung für alle Proben der Brennstäbe SF98 und SF99 identisch. Diese ist in Abb. 3.2 graphisch dargestellt.



**Abb. 3.2** Bestrahlungsgeschichte der Proben des Brennelements SF98

Für die Abbrandrechnungen wurde die Leistungsgeschichte für jedes Experiment mit einem Faktor so normiert, dass die Abweichung der berechneten zur gemessenen  $^{148}\text{Nd}$  Konzentration als Abbrandindikator minimiert wird.

Die isotopenaufgelöste Zusammensetzung der Proben wurden mithilfe zerstörender Analysemethoden ermittelt. Die gefundenen Konzentrationen werden in /MIC 17/ in Gramm pro Gramm anfänglichem Schwermetall (g/gSMi) für Aktinoide nach einer Abklingzeit von 2008,8 Tage angegeben. Diese Werte wurden in Gramm pro Tonne anfänglichem Schwermetall (g/tSMi) umgerechnet. Die Nukliddichten der Samarium Isotope werden nach der jeweiligen Abklingzeit angegeben, alle anderen Nuklide wurden auf den Zeitpunkt der Reaktorabschaltung korrigiert. Für die Proben aus Brennstab SF98 sind die Werte in Tab. 3.10 gezeigt, für die Proben aus Brennstab SF99 in Tab. 3.11.

**Tab. 3.10** Nuklidzusammensetzung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennelements SF98 (zum Zeitpunkt der Reaktorabschaltung, außer Sm Isotope nach der jeweiligen Abklingzeit)

Isotop	SF98-01	SF98-02	SF98-03	SF98-04	SF98-05	SF98-06	SF98-07	SF98-08
<sup>106</sup> Ru	1,749E+01	4,985E+01	1,091E+02	1,237E+02	1,326E+02	1,113E+02	1,309E+02	7,522E+01
<sup>125</sup> Sb	-	-	-	-	-	5,223E+00	-	-
<sup>134</sup> Cs	3,579E+00	3,214E+01	1,010E+02	1,407E+02	1,553E+02	1,514E+02	1,621E+02	6,979E+01
<sup>137</sup> Cs	1,634E+02	8,286E+02	1,329E+03	1,577E+03	1,588E+03	1,508E+03	1,559E+03	9,494E+02
<sup>144</sup> Ce	2,782E+01	1,833E+02	2,996E+02	3,538E+02	4,107E+02	3,520E+02	3,786E+02	2,867E+02
<sup>143</sup> Nd	1,208E+02	7,567E+02	8,234E+02	8,486E+02	9,039E+02	9,199E+02	9,183E+02	7,358E+02
<sup>144</sup> Nd	1,153E+02	8,511E+02	1,275E+03	1,492E+03	1,476E+03	1,284E+03	1,207E+03	7,478E+02
<sup>145</sup> Nd	9,192E+01	5,974E+02	7,648E+02	8,423E+02	8,667E+02	7,950E+02	7,845E+02	5,770E+02
<sup>146</sup> Nd	7,769E+01	5,278E+02	7,629E+02	8,916E+02	9,320E+02	8,427E+02	8,330E+02	5,550E+02
<sup>148</sup> Nd	4,560E+01	2,905E+02	4,058E+02	4,662E+02	4,850E+02	4,407E+02	4,356E+02	2,997E+02
<sup>150</sup> Nd	2,187E+01	1,279E+02	1,867E+02	2,193E+02	2,294E+02	2,098E+02	2,080E+02	1,389E+02
<sup>147</sup> Sm	4,777E+01	2,303E+02	3,091E+02	3,207E+02	3,025E+02	2,891E+02	2,800E+02	2,454E+02
<sup>148</sup> Sm	5,983E+00	5,771E+01	1,531E+02	1,971E+02	2,022E+02	1,855E+02	1,852E+02	1,079E+02
<sup>149</sup> Sm	6,367E-01	2,201E+00	2,553E+00	2,502E+00	3,701E+00	3,374E+00	4,199E+00	4,082E+00
<sup>150</sup> Sm	3,343E+01	1,790E+02	3,309E+02	3,865E+02	3,808E+02	3,536E+02	3,505E+02	2,408E+02
<sup>151</sup> Sm	2,554E+00	8,203E+00	9,192E+00	9,738E+00	1,039E+01	1,272E+01	1,310E+01	1,245E+01
<sup>152</sup> Sm	2,230E+01	9,016E+01	1,425E+02	1,555E+02	1,432E+02	1,233E+02	1,222E+02	9,771E+01
<sup>154</sup> Sm	4,561E+00	1,874E+01	3,950E+01	4,828E+01	4,912E+01	4,377E+01	4,472E+01	2,933E+01



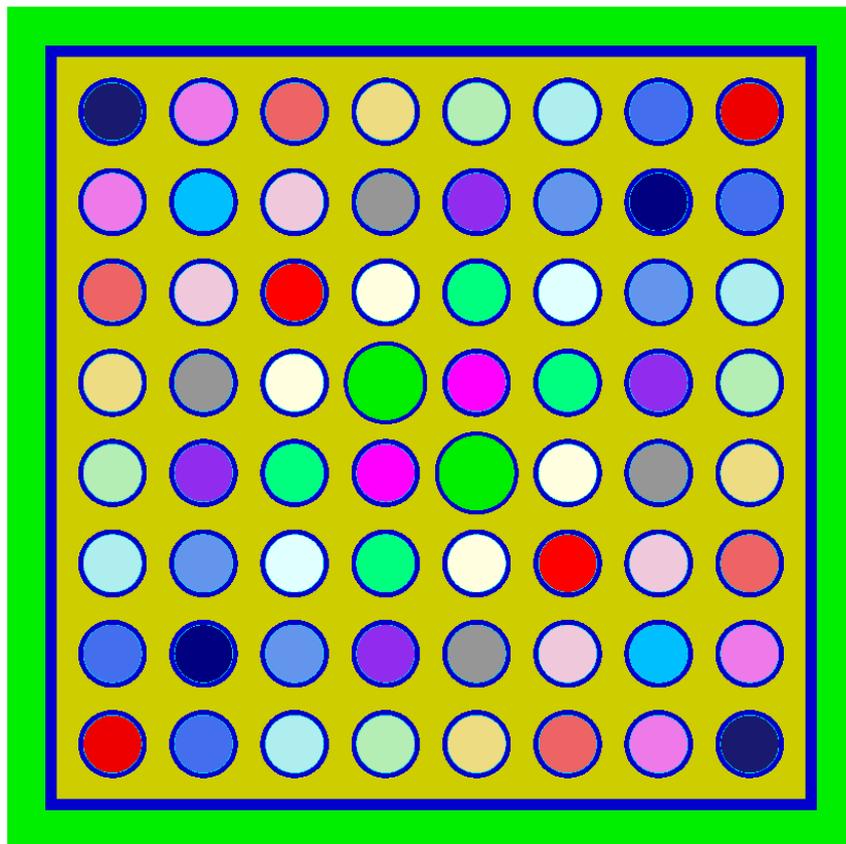
**Tab. 3.11** Nuklidzusammensetzung der Proben des Brennelements SF99 (zum Zeitpunkt der Reaktorabschaltung, außer Sm Isotope nach der jeweiligen Abklingzeit)

Isotop	SF99-01	SF99-02	SF99-03	SF99-04	SF99-05	SF99-06	SF99-07	SF99-08	SF99-09	SF99-10
<sup>106</sup> Ru	2,66E+04	3,28E+04	8,06E+04	7,83E+04	6,99E+04	6,90E+04	4,99E+04	4,37E+04	5,03E+04	3,86E+04
<sup>125</sup> Sb	9,66E+02	3,67E+03	4,21E+03	4,59E+03	4,67E+03	5,07E+03	3,84E+03	2,43E+03	1,23E+03	8,97E+02
<sup>134</sup> Cs	1,04E+04	4,64E+04	9,12E+04	1,13E+05	1,31E+05	1,14E+05	1,19E+05	5,68E+04	3,21E+04	1,09E+04
<sup>137</sup> Cs	2,86E+05	8,52E+05	1,23E+06	1,35E+06	1,43E+06	1,25E+06	1,27E+06	8,34E+05	6,33E+05	2,77E+05
<sup>144</sup> Ce	-	2,15E+05	-	2,92E+05	3,85E+05	3,17E+05	4,24E+05	2,54E+05	1,66E+05	-
<sup>143</sup> Nd	1,95E+05	6,14E+05	7,63E+05	7,81E+05	8,40E+05	7,98E+05	8,09E+05	6,14E+05	5,01E+05	1,90E+05
<sup>144</sup> Nd	2,63E+05	6,54E+05	1,32E+06	1,20E+06	1,17E+06	9,32E+05	8,17E+05	5,53E+05	4,41E+05	2,51E+05
<sup>145</sup> Nd	1,58E+05	4,92E+05	6,73E+05	7,20E+05	7,51E+05	6,52E+05	6,51E+05	4,67E+05	3,71E+05	1,52E+05
<sup>146</sup> Nd	1,41E+05	4,48E+05	6,61E+05	7,31E+05	7,77E+05	6,67E+05	6,65E+05	4,40E+05	3,31E+05	1,37E+05
<sup>148</sup> Nd	8,28E+04	2,49E+05	3,57E+05	3,90E+05	4,13E+05	3,58E+05	3,56E+05	2,41E+05	1,84E+05	7,97E+04
<sup>150</sup> Nd	4,18E+04	1,14E+05	1,67E+05	1,84E+05	1,98E+05	1,74E+05	1,72E+05	1,14E+05	8,44E+04	4,04E+04
<sup>147</sup> Sm	7,78E+04	-	2,61E+05	-	2,77E+05	-	2,44E+05	1,97E+05	1,63E+05	-
<sup>148</sup> Sm	1,65E+04	-	1,17E+05	-	1,58E+05	-	1,34E+05	7,55E+04	4,48E+04	-
<sup>149</sup> Sm	8,84E+02	-	2,47E+03	-	2,72E+03	-	3,43E+03	2,96E+03	2,60E+03	-
<sup>150</sup> Sm	6,17E+04	-	2,68E+05	-	3,25E+05	-	2,78E+05	1,83E+05	1,31E+05	-
<sup>151</sup> Sm	3,41E+03	-	8,49E+03	-	1,03E+04	-	1,29E+04	1,16E+04	1,00E+04	-
<sup>152</sup> Sm	3,95E+04	-	1,18E+05	-	1,27E+05	-	1,02E+05	7,73E+04	6,17E+04	-
<sup>154</sup> Sm	9,38E+03	-	3,35E+04	-	4,22E+04	-	3,58E+04	2,21E+04	1,54E+04	-
<sup>154</sup> Eu	2,66E+03	1,02E+04	1,79E+04	1,99E+04	2,47E+04	2,55E+04	2,66E+04	1,40E+04	8,22E+03	2,76E+03

Isotop	SF99-01	SF99-02	SF99-03	SF99-04	SF99-05	SF99-06	SF99-07	SF99-08	SF99-09	SF99-10
<sup>234</sup> U	3,90E+04	2,01E+05	1,78E+05	1,67E+05	1,60E+05	1,65E+05	1,64E+05	1,96E+05	2,18E+05	4,09E+04
<sup>235</sup> U	2,91E+06	1,40E+07	8,66E+06	6,98E+06	7,38E+06	1,05E+07	1,09E+07	1,58E+07	1,91E+07	3,04E+06
<sup>236</sup> U	6,87E+05	3,47E+06	4,25E+06	4,48E+06	4,52E+06	4,30E+06	4,25E+06	3,46E+06	2,83E+06	6,74E+05
<sup>238</sup> U	9,84E+08	9,52E+08	9,45E+08	9,43E+08	9,39E+08	9,41E+08	9,40E+08	9,49E+08	9,54E+08	9,84E+08
<sup>237</sup> Np	5,67E+04	2,18E+05	3,63E+05	3,67E+05	4,62E+05	4,15E+05	4,46E+05	2,76E+05	1,98E+05	5,49E+04
<sup>238</sup> Pu	1,13E+04	3,96E+04	9,70E+04	1,15E+05	1,23E+05	1,37E+05	1,38E+05	6,48E+04	3,43E+04	1,10E+04
<sup>239</sup> Pu	3,01E+06	3,91E+06	3,98E+06	3,87E+06	4,55E+06	5,63E+06	6,04E+06	5,45E+06	4,73E+06	3,01E+06
<sup>240</sup> Pu	1,06E+06	1,52E+06	2,13E+06	2,29E+06	2,54E+06	2,45E+06	2,49E+06	1,65E+06	1,18E+06	1,05E+06
<sup>241</sup> Pu	3,60E+05	6,76E+05	9,45E+05	1,01E+06	1,20E+06	1,26E+06	1,31E+06	8,33E+05	5,37E+05	3,36E+05
<sup>242</sup> Pu	8,24E+04	1,90E+05	4,37E+05	5,57E+05	6,07E+05	4,33E+05	4,22E+05	1,72E+05	8,33E+04	7,33E+04
<sup>241</sup> Am	2,70E+04	2,11E+04	3,95E+04	3,41E+04	4,36E+04	4,56E+04	4,85E+04	3,62E+04	2,89E+04	1,61E+04
<sup>242m</sup> Am	2,47E+02	4,24E+02	5,44E+02	5,42E+02	6,92E+02	9,31E+02	9,24E+02	6,81E+02	4,08E+02	2,14E+02
<sup>243</sup> Am	5,79E+03	1,90E+04	6,50E+04	9,04E+04	1,13E+05	8,51E+04	8,45E+04	2,57E+04	9,26E+03	5,62E+03
<sup>242</sup> Cm	2,85E+03	1,62E+04	2,27E+04	3,48E+04	6,13E+04	3,84E+04	4,07E+04	1,59E+04	5,53E+03	3,58E+03
<sup>243</sup> Cm	3,00E+01	9,31E+01	2,76E+02	3,69E+02	4,75E+02	4,41E+02	4,76E+02	1,63E+02	7,26E+01	3,28E+01
<sup>244</sup> Cm	5,89E+02	3,18E+03	1,65E+04	2,69E+04	3,87E+04	3,01E+04	3,00E+04	6,15E+03	1,52E+03	6,83E+02
<sup>245</sup> Cm	1,01E+01	8,76E+01	5,70E+02	1,01E+03	1,77E+03	1,74E+03	1,79E+03	2,70E+02	8,19E+01	1,32E+01
<sup>246</sup> Cm	9,57E-01	-	6,95E+01	1,50E+02	2,41E+02	1,60E+02	1,56E+02	1,44E+01	1,22E+01	-
<sup>247</sup> Cm	3,95E-01	-	1,43E+00	-	2,81E+00	-	3,88E+00	-	1,22E+01	-

### 3.1.2 Modellierung

Bei der Modellierung wurde darauf geachtet die gegebenen experimentellen Bedingungen möglichst originalgetreu nachzubilden und dabei vorhandene Symmetrien auszunutzen, um die Rechnung zu vereinfachen ohne Details zu verlieren. Zwar wurde das Brennelement komplett modelliert, aber aufgrund der Symmetrie entlang der beiden Diagonalen musste nur für die Hälfte des Brennelements individuelle Brennstäbe modelliert werden. Dies reduziert die Anzahl an individuell zu betrachtenden Brennstäben auf 20. Abb. 3.3 zeigt die Implementierung des Brennelements in SCALE-Geometrie. Bei dem Brennelement 17G wurden die gadoliniumhaltigen Brennstäbe für die Berechnung in 10 Ringzonen mit gleicher Fläche unterteilt, um den aufgrund der Neutronenselbstabschirmung radial variierenden Gadoliniumabbbrand genauer berechnen zu können.



**Abb. 3.3** Implementierung der Brennelemente in SCALE-Geometrie

Die Brennstäbe wurden wie in den experimentellen Daten angegeben mit einem heli-umgefüllten Zwischenraum zwischen Brennstoff und Hüllrohr modelliert (Kernzahldichte =  $2.404400E-04$ ). Die geometrischen Abmessungen und Materialdaten wurden wie

in Kapitel 3.1.1 beschrieben übernommen. Die Parameter der Abbrandrechnungen sind in Tab. 2.13 wiedergegeben. Die betrachteten Nuklide sind in Tab. 3.12 angegeben.

**Tab. 3.12** Liste der betrachteten Nuklide

Betrachtete Nuklide						
$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{U}$			
$^{237}\text{Np}$						
$^{238}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$		
$^{241}\text{Am}$	$^{242\text{m}1}\text{Am}$	$^{243}\text{Am}$				
$^{242}\text{Cm}$	$^{243}\text{Cm}$	$^{244}\text{Cm}$	$^{245}\text{Cm}$	$^{246}\text{Cm}$	$^{247}\text{Cm}$	
$^{143}\text{Nd}$	$^{144}\text{Nd}$	$^{145}\text{Nd}$	$^{146}\text{Nd}$	$^{148}\text{Nd}$	$^{150}\text{Nd}$	
$^{147}\text{Sm}$	$^{148}\text{Sm}$	$^{149}\text{Sm}$	$^{150}\text{Sm}$	$^{151}\text{Sm}$	$^{152}\text{Sm}$	$^{154}\text{Sm}$
$^{106}\text{Ru}$	$^{125}\text{Sb}$					
$^{134}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$					
$^{144}\text{Ce}$	$^{154}\text{Eu}$					

### 3.1.3 Resultate

Die Ergebnisse für die Proben aus Fukushima Daini-2 sind in Tab. 3.13 und Tab. 3.14 sowie in graphischer Form in Abb. 3.4 – Abb. 3.6 gezeigt. Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen Rechnung und Experiment eine mit den DWR-Proben vergleichbare Qualität. Es lassen sich keine auffällig größeren Abweichungen feststellen. Im Detail ergibt sich folgendes Bild: Bei den Proben des Stabs SF98 werden die Uran-Nuklide gut getroffen während sich für die Plutonium-Nuklide eine leichte Unterschätzung ergibt. Dies gilt insbesondere auch für  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$ . Aufgrund der Schwierigkeit einer exakten Bestimmung des Dampfblasengehalts an den Probenpositionen stellt sich die Frage, ob eventuell Trends aufgrund der axialen Änderung des Neutronenspektrums sichtbar werden. Beim Stab SF98 ist eine geringfügig höhere Unterschätzung des  $^{239}\text{Pu}$  Gehalts bei den Proben aus der Mitte des Stabs im Vergleich zu den weiter von den Enden stammenden Proben zu erkennen. Für die höheren Aktinoiden zeigt sich eine Unterschätzung, die sich im von der Nachrechnung von DWR-Proben bekannten Rahmen bewegt. Auffällig ist lediglich die große Unterschätzung von  $^{242}\text{Cm}$ . Die Spaltprodukte zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment, mit Ausnahme der Samarium-Nuklide, die im Vergleich zu anderen Proben stärker unterschätzt werden.

Bei den Proben des Stabs SF99 zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier wird  $^{235}\text{U}$  durch die Rechnung leicht überschätzt, während  $^{239}\text{Pu}$  gut getroffen wird. Es ist ein leichter Trend der C/E-1-Werte über die axiale Probenposition zu erkennen. Die übrigen Uran- und Plutonium-Nuklide zeigen eine gute Übereinstimmung. Bei den höheren Aktinoiden ist eine Unterschätzung im normalen Rahmen zu sehen, mit Ausnahme von  $^{242}\text{Cm}$  und  $^{247}\text{Cm}$  die stark unterschätzt werden. Hinsichtlich der Spaltprodukte ist eine deutliche Unterschätzung für die Cäsium-Nuklide auszumachen, während die Samarium-Nuklide überdurchschnittlich gut übereinstimmen.  $^{144}\text{Ce}$  und  $^{144}\text{Nd}$  weisen eine große Streuung der C/E-1-Werte auf.

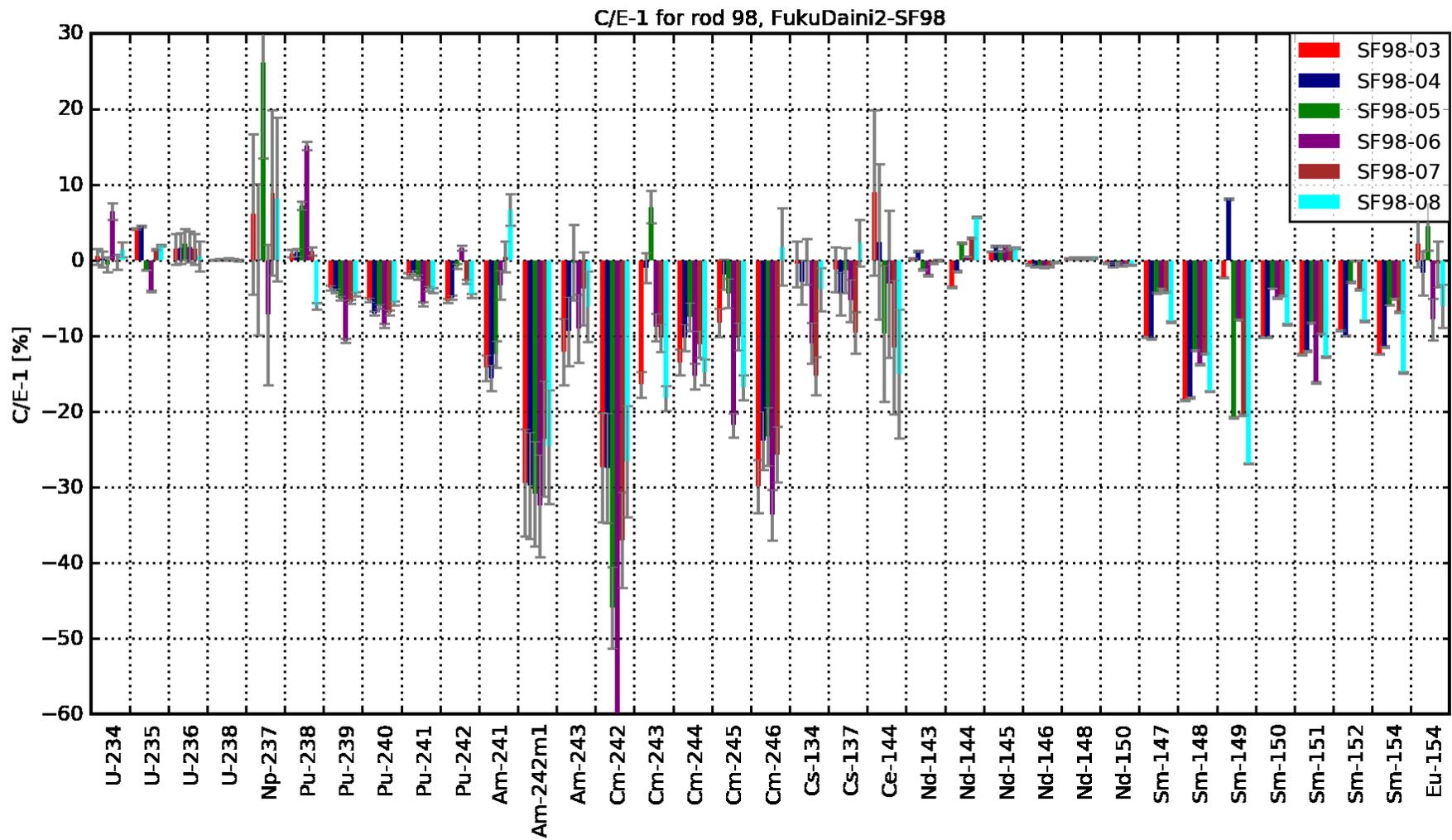
Die Darstellung der über die Stäbe gemittelten Ergebnisse (Abb. 3.6 und Abb. 3.7) bestätigt im Wesentlichen die an den Einzelproben gemachten Beobachtungen. Auffällig ist vor allem die relativ große Streuung bei den höheren Aktinoiden.

**Tab. 3.13** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %

	SF98-03	SF98-04	SF98-05	SF98-06	SF98-07	SF98-08
<sup>234</sup> U	0,5	0,1	-0,6	6,4	-0,2	1,4
<sup>235</sup> U	4,1	4,5	-1,3	-4,1	1,4	1,9
<sup>236</sup> U	1,5	1,6	2,1	1,8	1,5	0,5
<sup>238</sup> U	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
<sup>237</sup> Np	6,1	0,1	26,1	-7,2	8,9	8,1
<sup>238</sup> Pu	0,9	1,1	7,3	15,1	1,2	-6,1
<sup>239</sup> Pu	-3,7	-4,0	-5,1	-10,6	-5,5	-4,5
<sup>240</sup> Pu	-5,3	-7,0	-6,1	-8,6	-6,9	-5,7
<sup>241</sup> Pu	-2,0	-1,6	-2,2	-5,8	-3,8	-4,0
<sup>242</sup> Pu	-5,4	-4,9	-0,8	1,7	-2,8	-4,7
<sup>241</sup> Am	-14,2	-15,6	-12,4	-3,3	0,4	6,7
<sup>242m1</sup> Am	-29,4	-29,8	-30,9	-32,4	-23,6	-24,6
<sup>243</sup> Am	-12,1	-9,4	-0,3	-9,0	-3,7	-6,1
<sup>242</sup> Cm	-27,4	-27,5	-45,9	-70,3	-37,0	-26,6
<sup>243</sup> Cm	-16,4	-1,0	7,0	-8,8	-10,3	-18,2
<sup>244</sup> Cm	-13,5	-10,2	-7,5	-15,3	-11,1	-14,8
<sup>245</sup> Cm	-8,2	-1,9	-4,4	-21,8	-10,1	-16,8
<sup>246</sup> Cm	-29,9	-23,8	-23,3	-33,7	-25,7	1,8
<sup>106</sup> Ru	16,6	31,3	33,0	39,7	18,7	16,2
<sup>125</sup> Sb	-	-	-	76,9	-	-
<sup>134</sup> Cs	-0,5	-2,9	-0,2	-11,0	-15,3	-3,9
<sup>137</sup> Cs	-1,2	-4,4	-1,3	-5,3	-9,6	2,3
<sup>144</sup> Ce	8,9	2,4	-9,7	-3,1	-11,5	-15,0
<sup>143</sup> Nd	0,2	1,2	-1,2	-2,0	-0,4	0,0
<sup>144</sup> Nd	-3,6	-1,4	2,2	0,5	3,0	5,6
<sup>145</sup> Nd	1,1	1,8	1,2	1,9	1,4	1,6
<sup>146</sup> Nd	-0,5	-0,8	-0,7	-0,9	-0,8	-0,3
<sup>148</sup> Nd	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
<sup>150</sup> Nd	-0,4	-0,8	-0,3	-0,7	-0,5	-0,6
<sup>147</sup> Sm	-10,1	-10,4	-4,3	-3,7	-4,2	-8,1
<sup>148</sup> Sm	-18,5	-18,1	-11,9	-13,7	-12,3	-17,3
<sup>149</sup> Sm	-2,3	8,2	-20,8	-7,8	-20,4	-26,9
<sup>150</sup> Sm	-10,1	-10,1	-3,7	-4,9	-4,6	-8,5
<sup>151</sup> Sm	-12,4	-12,0	-8,3	-16,2	-9,7	-12,8
<sup>152</sup> Sm	-9,3	-10,0	-2,9	-0,1	-3,8	-8,0
<sup>154</sup> Sm	-12,4	-11,4	-5,9	-5,1	-6,9	-14,9
<sup>154</sup> Eu	2,2	-1,7	4,5	-7,8	-0,5	-6,1

**Tab. 3.14** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in %

	SF99 -02	SF99 -03	SF99 -04	SF99 -05	SF99 -06	SF99 -07	SF99 -08	SF99 -09	SF99 -10
<sup>234</sup> U	8,9	5,3	6,8	5,8	8,6	7,7	7,7	4,9	15,8
<sup>235</sup> U	7,3	8,9	17,3	6,2	5,9	6,9	3,8	3,4	4,2
<sup>236</sup> U	1,5	2,8	1,7	3,2	1,5	2,3	1,2	3,3	-1,3
<sup>238</sup> U	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0
<sup>237</sup> Np	-2,5	-10,3	0,1	-10,6	-4,3	-7,3	-6,0	-5,1	5,2
<sup>238</sup> Pu	27,1	12,9	18,2	35,6	9,7	18,1	7,1	13,5	10,8
<sup>239</sup> Pu	-2,9	-4,0	0,7	-7,0	-8,0	-4,8	-2,5	3,6	8,7
<sup>240</sup> Pu	0,8	-2,1	-2,1	-5,7	-4,4	-3,6	-3,8	0,0	-1,9
<sup>241</sup> Pu	0,4	2,1	4,0	-1,1	-2,1	0,2	-0,2	7,5	6,9
<sup>242</sup> Pu	1,7	3,9	-0,4	4,1	5,7	4,4	0,0	5,9	-2,7
<sup>241</sup> Am	10,8	-28,7	-14,6	-24,9	-12,3	-9,6	-9,4	-16,3	5,8
<sup>242m1</sup> Am	-30,5	-32,5	-28,8	-34,5	-34,6	-23,9	-25,9	-14,0	-8,2
<sup>243</sup> Am	-2,4	-2,1	-4,8	-2,8	-7,6	-4,5	-10,5	-1,1	-6,5
<sup>242</sup> Cm	-60,8	-42,4	-55,7	-70,6	-58,6	-59,7	-54,9	-29,9	-31,7
<sup>243</sup> Cm	3,8	5,0	2,8	3,8	-4,5	-4,6	-16,5	-21,7	-18,7
<sup>244</sup> Cm	-4,9	-0,5	-6,3	-3,9	-15,5	-7,6	-16,6	0,7	-8,9
<sup>245</sup> Cm	-5,3	6,1	-0,2	-0,4	-21,9	-9,5	-18,4	-37,2	0,3
<sup>246</sup> Cm	-	-12,4	-23,1	-15,5	-31,8	-22,9	-33,7	-86,8	-
<sup>106</sup> Ru	-	-68,1	-	-27,3	-	-65,5	-	-99,9	-
<sup>125</sup> Sb	154,9	72,8	102,8	150,4	112,4	193,7	82,4	8,6	-9,3
<sup>134</sup> Cs	45,0	89,8	92,9	105,3	65,9	120,4	116,6	214,2	135,4
<sup>137</sup> Cs	-9,4	-5,1	-7,0	-7,4	-13,7	-16,6	-15,2	-10,4	-13,8
<sup>144</sup> Ce	-4,5	-5,4	-5,6	-5,7	-6,9	-9,1	-6,3	-6,0	-6,2
<sup>143</sup> Nd	22,1	-	27,9	-0,2	4,7	-23,6	-14,0	3,7	-
<sup>144</sup> Nd	-0,9	-1,2	0,7	-2,2	-1,3	-2,0	-1,3	-2,4	-0,5
<sup>145</sup> Nd	-10,2	-28,8	-12,4	-4,2	-4,3	6,3	3,5	-5,1	-26,1
<sup>146</sup> Nd	0,8	0,5	0,7	0,4	1,6	0,1	0,8	-0,4	0,1
<sup>148</sup> Nd	-0,4	-1,1	-1,7	-1,5	-1,6	-1,9	-0,8	-0,6	-0,6
<sup>150</sup> Nd	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	-0,4	0,1	0,0	0,3
<sup>147</sup> Sm	0,5	0,7	0,7	0,6	-0,5	-0,2	-0,4	0,7	0,5
<sup>148</sup> Sm	-	-0,8	-	-2,1	-	-0,8	-2,2	-2,0	-
<sup>149</sup> Sm	-	-11,8	-	-13,6	-	-11,7	-13,3	-6,2	-
<sup>150</sup> Sm	-	12,7	-	14,7	-	3,3	1,4	7,2	-
<sup>151</sup> Sm	-	-0,4	-	-2,8	-	-2,1	-3,6	-0,4	-
<sup>152</sup> Sm	-	-2,5	-	-7,7	-	-7,2	-7,3	0,6	-
<sup>154</sup> Sm	-	0,8	-	-0,5	-	1,7	-0,8	-0,9	-
<sup>154</sup> Eu	-	-1,2	-	-2,0	-	-1,0	-5,0	-2,7	-
<sup>234</sup> U	5,5	3,5	7,1	0,7	-5,7	-2,6	-4,4	1,9	4,4



**Abb. 3.4** Fukushima Daini-2, SF98: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

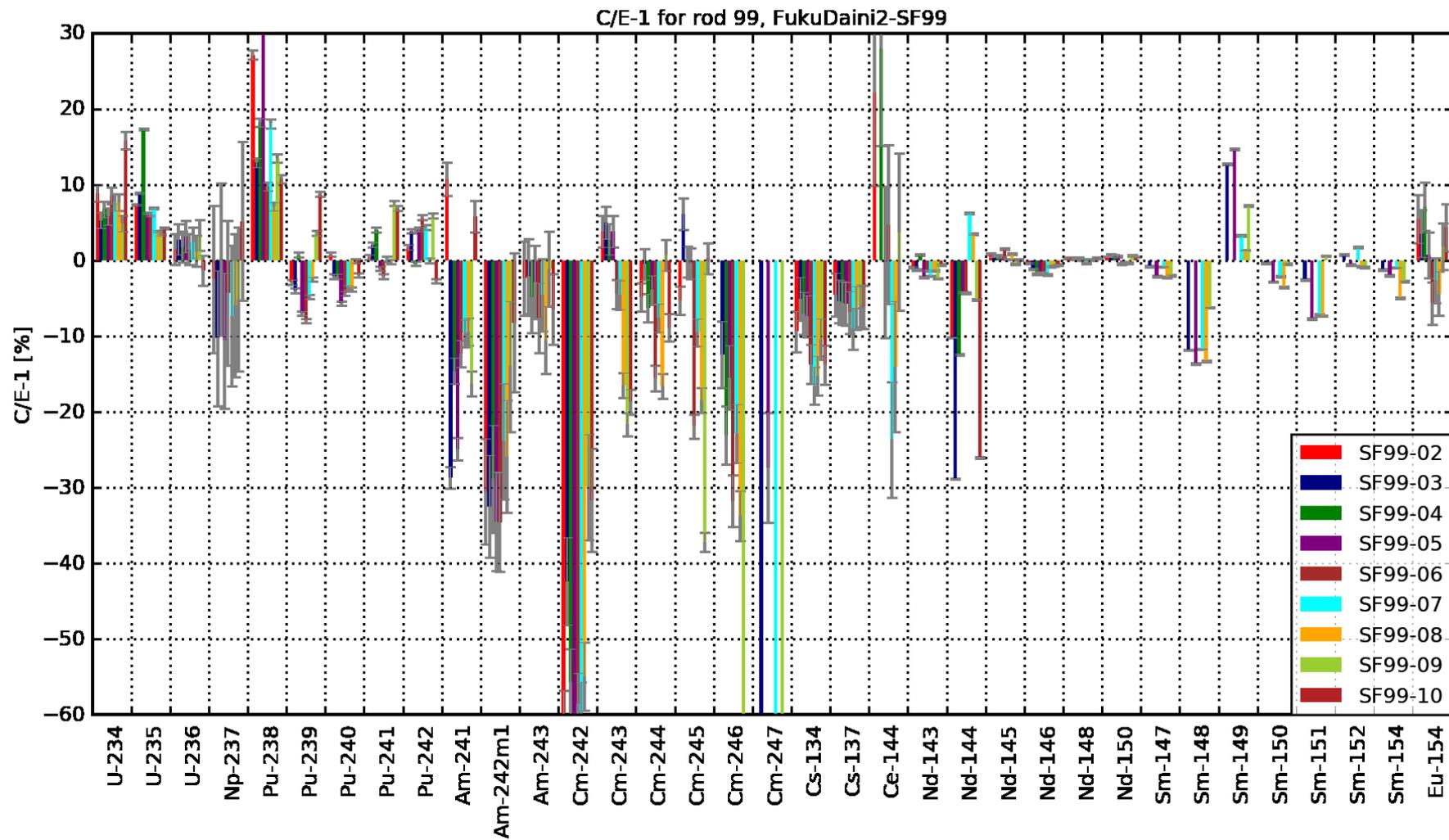


Abb. 3.5 Fukushima Daini-2, SF99: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent

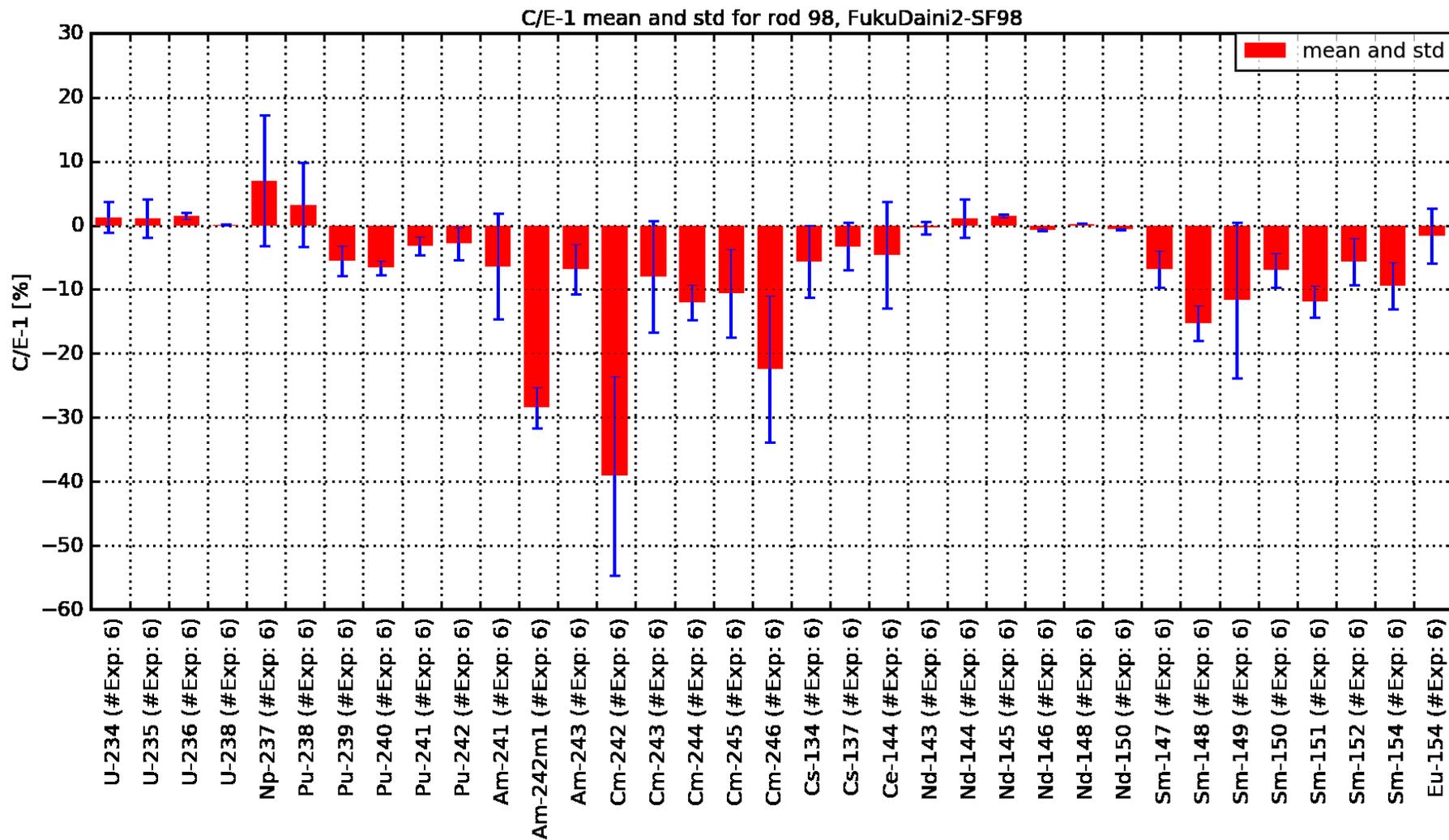


Abb. 3.6 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben des Brennelements SF98

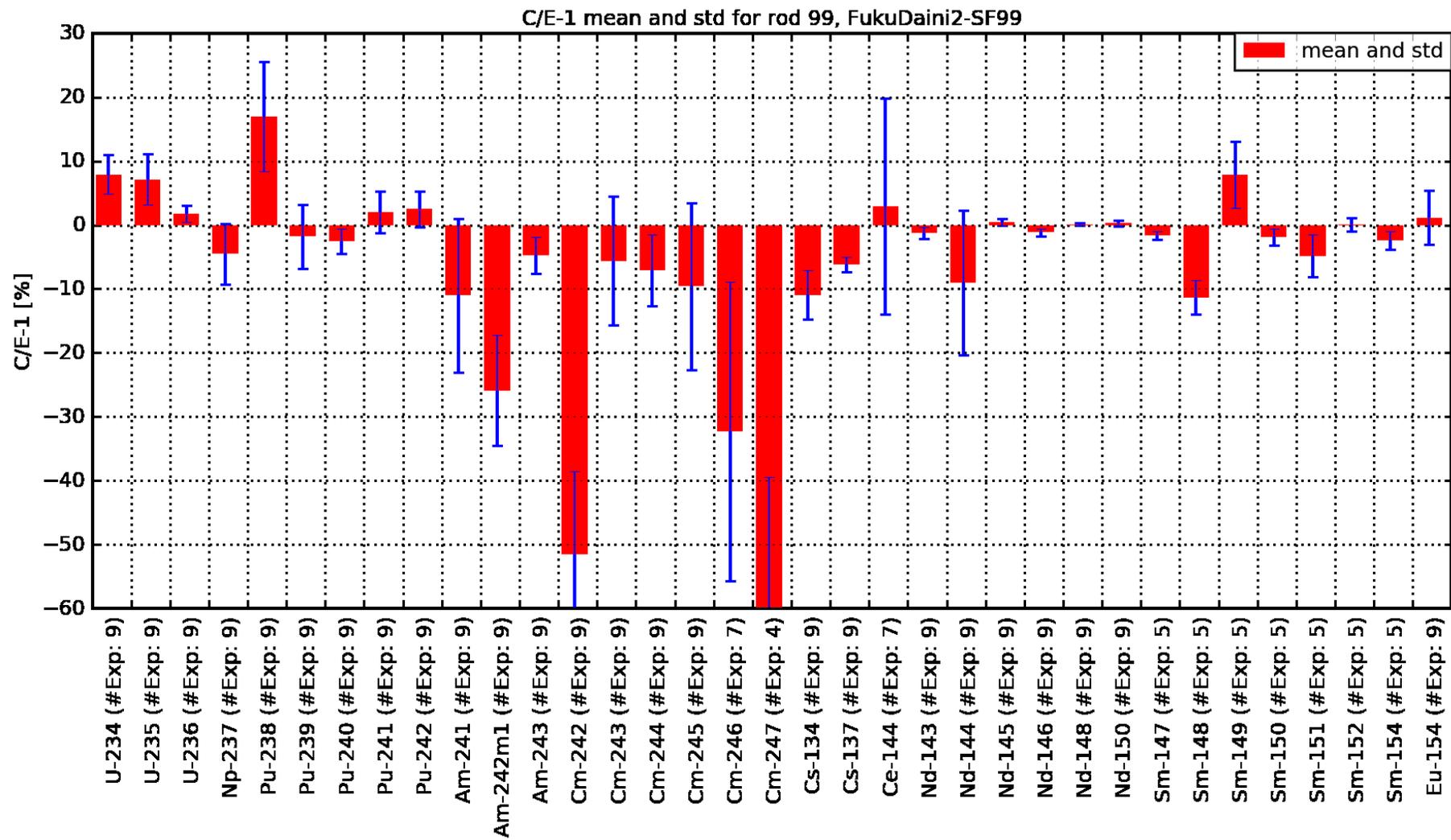


Abb. 3.7 Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben des Brennelements SF99

## 4 Zusammenfassung der Nachrechnungen

Um die Ergebnisse der in den vorhergehenden Kapiteln dokumentierten Validierungsrechnungen an Nachbestrahlungsanalyseproben verschiedener Reaktoren zusammenfassend zu quantifizieren, werden im Folgenden nuklidweise gemittelte Ergebnisse dargestellt und anhand vergleichbarer Analysen eingeordnet. Die Analyse erfolgt getrennt für DWR-Proben und SWR-Proben. Es ist außerdem anzumerken, dass es sich hierbei um eine von einer speziellen Problemstellung unabhängige und insofern generische Validierung handelt. Validierungsrechnungen für problemspezifische Analysen erfordern eventuell eine Auswahl passender experimenteller Daten und zusätzliche Auswertungs- und Bewertungsschritte. Ein Beispiel hierfür ist die Validierung eines Abbrandprogramms für die Inventarbestimmung bei der Anwendung von Abbrandkredit bei Analysen zur Kritikalitätssicherheit. Eine solche Validierung ist beispielhaft für das Programm KENOREST in /BEH 14/ durchgeführt worden. Die vorliegende Datenbasis von Probennachrechnungen kann direkt für eine Validierung anhand des dort beschriebenen Verfahrens eingesetzt werden.

### 4.1 DWR

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Gesamtheit der hier gesammelten Nachrechnungen von Nachbestrahlungsanalyseproben aus DWR-Anlagen analysiert. In Tab. 4.1 sind für alle Nuklide für die Messdaten zur Verfügung stehen der Mittelwert der C/E-1-Werte über alle in Kapitel 0 beschriebenen DWR-Proben dargestellt. Ebenso enthält die Tabelle die zugehörigen Standardabweichungen und für jedes Nuklid die Anzahl der Proben, für die ein Messwert vorhanden ist. In Abb. 4.1 sind diese Daten in graphischer Form dargestellt. Mit Ausnahme der aufgrund der geringen Konzentrationen schwer zu messenden Nuklide  $^{232}\text{U}$ ,  $^{236}\text{Pu}$  und  $^{244}\text{Pu}$  liegen die Mittelwerte der Uran- und Plutonium-Nuklide in einem Bereich  $\pm 6\%$ , und weisen relativ geringe Varianzen auf. Die übrigen Aktinoiden weisen größtenteils niedrige zweistellige, teilweise auch einstellige Abweichungen auf. Allerdings sind die Standardabweichungen deutlich größer als bei Uran und Plutonium, d. h. die Streuung der individuellen Datenpunkte ist wesentlich größer. Bei den Spaltprodukten fallen vor allem die Neodym-, Caesium und einige der Samarium-Nuklide durch gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung auf größere Abweichungen gibt es vor allem bei den Europium- und Gadolinium-Nukliden, wobei hier große Varianzen auf hohe Ungenauigkeiten bei den einzelnen Messungen hindeuten.

**Tab. 4.1** Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle DWR-Proben

Nuklid	# Proben	C/E - 1 Mittelwert	$\sigma$ (C/E - 1)	Nuklid	# Proben	C/E - 1 Mittelwert	$\sigma$ (C/E - 1)
<sup>232</sup> U	6	-37,2	50,0	<sup>125</sup> Sb	23	86,5	44,1
<sup>234</sup> U	59	6,0	10,9	<sup>129</sup> I	6	10,9	60,3
<sup>235</sup> U	59	0,2	5,0	<sup>133</sup> Cs	14	2,9	2,1
<sup>236</sup> U	59	-0,5	3,3	<sup>134</sup> Cs	41	-7,8	7,9
<sup>238</sup> U	48	-0,2	0,5	<sup>135</sup> Cs	20	0,5	3,0
<sup>237</sup> Np	53	-1,4	17,2	<sup>137</sup> Cs	59	-2,1	4,9
<sup>236</sup> Pu	6	45,3	11,6	<sup>140</sup> Ce	5	3,0	1,1
<sup>238</sup> Pu	59	-4,2	12,2	<sup>142</sup> Ce	5	5,7	0,9
<sup>239</sup> Pu	59	-2,5	4,3	<sup>144</sup> Ce	24	2,7	8,0
<sup>240</sup> Pu	59	-0,2	6,0	<sup>142</sup> Nd	22	-4,8	11,5
<sup>241</sup> Pu	59	-5,7	4,9	<sup>143</sup> Nd	54	0,4	3,5
<sup>242</sup> Pu	59	-3,2	7,6	<sup>144</sup> Nd	35	-2,4	2,4
<sup>244</sup> Pu	3	-42,3	11,5	<sup>145</sup> Nd	54	1,0	2,4
<sup>241</sup> Am	59	-1,7	19,0	<sup>146</sup> Nd	43	-0,9	0,7
<sup>242m1</sup> Am	38	-24,9	13,8	<sup>148</sup> Nd	54	0,0	0,1
<sup>243</sup> Am	50	-8,0	12,1	<sup>150</sup> Nd	42	-0,2	1,5
<sup>242</sup> Cm	32	-10,7	16,7	<sup>147</sup> Pm	5	17,9	23,9
<sup>243</sup> Cm	28	-0,6	48,3	<sup>147</sup> Sm	39	5,6	9,4
<sup>244</sup> Cm	39	-10,7	11,4	<sup>148</sup> Sm	20	-5,7	2,8
<sup>245</sup> Cm	30	-9,2	17,5	<sup>149</sup> Sm	35	-3,3	6,5
<sup>246</sup> Cm	20	-17,4	16,5	<sup>150</sup> Sm	39	3,1	5,5
<sup>247</sup> Cm	10	-29,7	7,3	<sup>151</sup> Sm	39	-9,0	6,2
<sup>79</sup> Se	9	14,1	13,1	<sup>152</sup> Sm	39	3,7	4,1
<sup>90</sup> Sr	14	-9,0	6,3	<sup>154</sup> Sm	20	2,0	6,0
<sup>95</sup> Mo	22	-3,5	8,9	<sup>151</sup> Eu	28	-29,0	20,5
<sup>99</sup> Tc	31	5,6	16,5	<sup>153</sup> Eu	34	-2,3	3,8
<sup>101</sup> Ru	17	4,4	11,8	<sup>154</sup> Eu	35	8,3	7,3
<sup>106</sup> Ru	25	11,3	23,1	<sup>155</sup> Eu	26	-17,0	19,7
<sup>103</sup> Rh	22	8,5	15,9	<sup>154</sup> Gd	9	10,0	15,9
<sup>105</sup> Pd	1	50,1	0,0	<sup>155</sup> Gd	33	-14,9	15,4
<sup>108</sup> Pd	1	55,5	0,0	<sup>156</sup> Gd	9	9,8	27,6
<sup>109</sup> Ag	20	64,5	57,5	<sup>157</sup> Gd	5	-22,3	10,1
<sup>110m1</sup> Ag	5	70,7	38,1	<sup>158</sup> Gd	9	17,4	17,3
<sup>126</sup> Sn	9	46,9	13,2	<sup>160</sup> Gd	7	-5,6	17,7

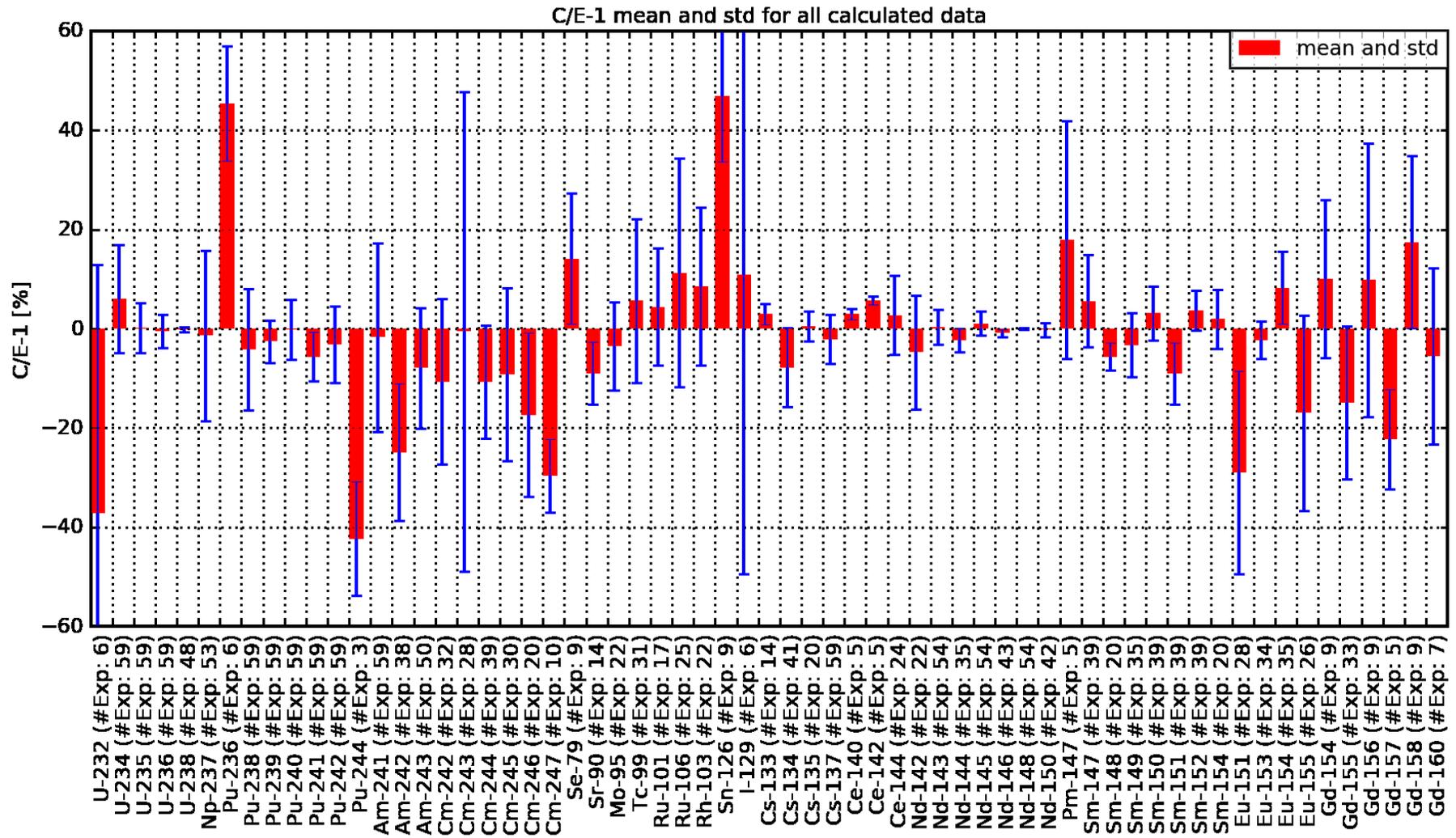
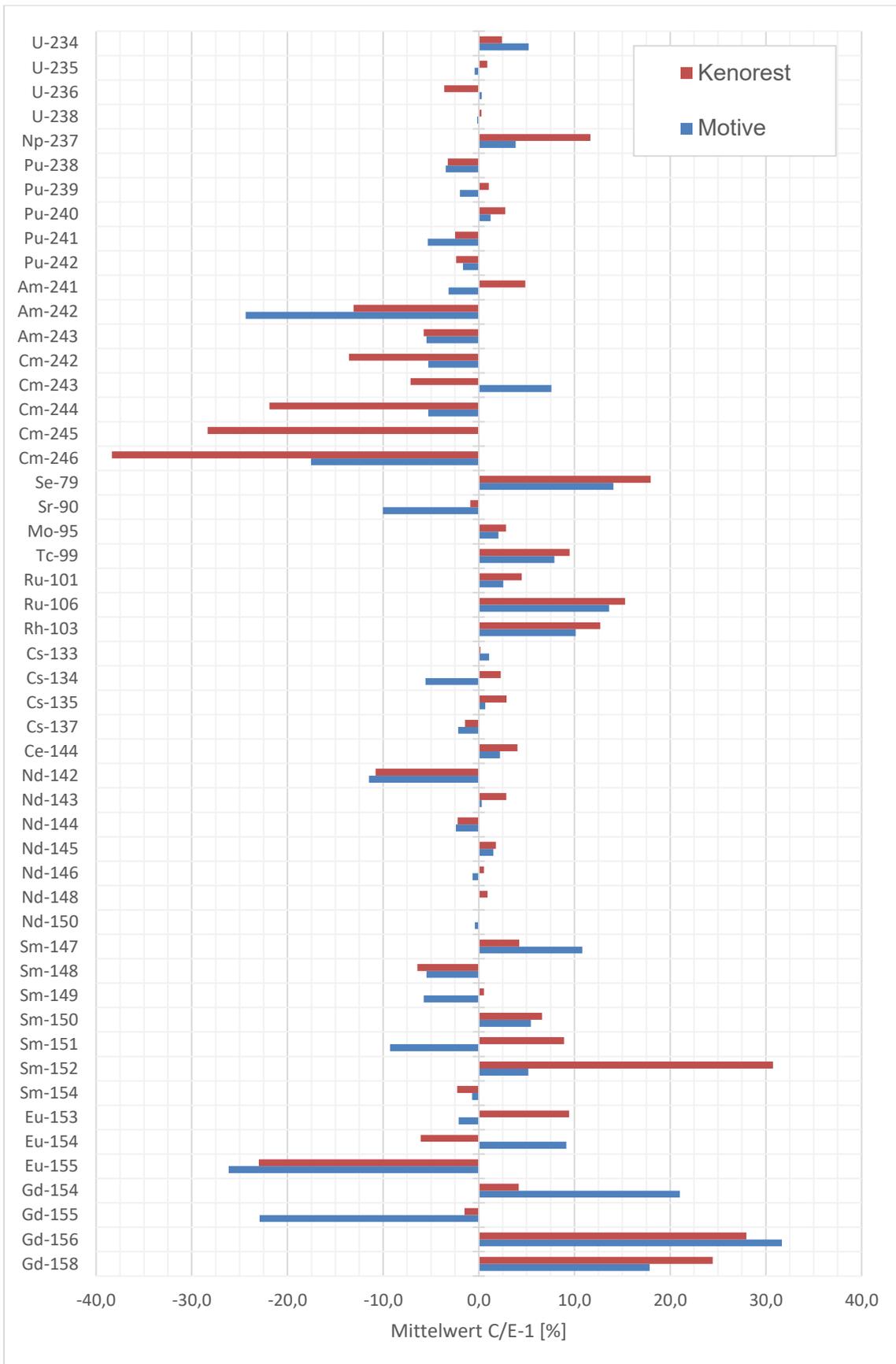


Abb. 4.1 Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle DWR-Proben

**Tab. 4.2** Vergleich C/E-1 für MOTIVE und KENOREST

Nuklid	# Proben	C/E - 1 Mittelwert MOTIVE	C/E - 1 Mittelwert KENOREST	Nuklid	# Proben	C/E - 1 Mittelwert MOTIVE	C/E - 1 Mittelwert KENOREST
<sup>232</sup> U	6	-37,2	-43,4	<sup>133</sup> Cs	4	1,1	0,2
<sup>234</sup> U	41	5,2	2,4	<sup>134</sup> Cs	24	-5,6	2,3
<sup>235</sup> U	41	-0,4	0,9	<sup>135</sup> Cs	10	0,7	2,9
<sup>236</sup> U	41	0,3	-3,6	<sup>137</sup> Cs	41	-2,2	-1,5
<sup>238</sup> U	30	-0,2	0,3	<sup>144</sup> Ce	21	2,2	4,0
<sup>237</sup> Np	35	3,8	11,7	<sup>142</sup> Nd	12	-11,5	-10,8
<sup>236</sup> Pu	6	45,3	38,7	<sup>143</sup> Nd	36	0,3	2,9
<sup>238</sup> Pu	41	-3,5	-3,2	<sup>144</sup> Nd	25	-2,4	-2,2
<sup>239</sup> Pu	41	-2,0	1,0	<sup>145</sup> Nd	36	1,5	1,8
<sup>240</sup> Pu	41	1,2	2,8	<sup>146</sup> Nd	25	-0,6	0,5
<sup>241</sup> Pu	41	-5,3	-2,5	<sup>148</sup> Nd	36	0,1	0,9
<sup>242</sup> Pu	41	-1,7	-2,4	<sup>150</sup> Nd	24	-0,4	-0,1
<sup>244</sup> Pu	1	-27,1	-41,4	<sup>147</sup> Pm	1	45,7	30,8
<sup>241</sup> Am	41	-3,2	4,8	<sup>147</sup> Sm	21	10,8	4,2
<sup>242m1</sup> Am	26	-24,4	-13,1	<sup>148</sup> Sm	10	-5,5	-6,4
<sup>243</sup> Am	32	-5,5	-5,8	<sup>149</sup> Sm	17	-5,8	0,5
<sup>242</sup> Cm	21	-5,3	-13,6	<sup>150</sup> Sm	21	5,4	6,6
<sup>243</sup> Cm	17	7,6	-7,2	<sup>151</sup> Sm	21	-9,3	8,9
<sup>244</sup> Cm	21	-5,3	-21,9	<sup>152</sup> Sm	21	5,2	30,7
<sup>245</sup> Cm	17	0,0	-28,3	<sup>154</sup> Sm	10	-0,7	-2,3
<sup>246</sup> Cm	17	-17,5	-38,3	<sup>151</sup> Eu	12	-48,1	-24,6
<sup>247</sup> Cm	10	-29,7	-45,4	<sup>153</sup> Eu	16	-2,1	9,4
<sup>79</sup> Se	9	14,1	18,0	<sup>154</sup> Eu	25	9,2	-6,1
<sup>90</sup> Sr	10	-10,0	-0,9	<sup>155</sup> Eu	16	-26,1	-23,0
<sup>95</sup> Mo	12	2,1	2,8	<sup>154</sup> Gd	3	21,0	4,2
<sup>99</sup> Tc	21	7,9	9,5	<sup>155</sup> Gd	15	-22,9	-1,5
<sup>101</sup> Ru	12	2,5	4,5	<sup>156</sup> Gd	3	31,7	28,0
<sup>106</sup> Ru	21	13,6	15,3	<sup>158</sup> Gd	3	17,8	24,4
<sup>103</sup> Rh	12	10,1	12,7	<sup>160</sup> Gd	1	-48,2	-48,7
<sup>126</sup> Sn	9	46,9	33,8				



**Abb. 4.2** Vergleich C/E-1 für MOTIVE und KENOREST

#### 4.1.1 Vergleich mit KENOREST

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist vor allem auch ein Vergleich mit anderen Abbrandprogrammen von Bedeutung, insbesondere mit den Ergebnissen entsprechender Rechnungen für das Vorgängerprogramm KENOREST. Um einen entsprechenden Vergleich zu ermöglichen, wurde aus den im hier vorliegenden Bericht berücksichtigten Proben eine Untermenge ausgewählt, für die auch Nachrechnungsergebnisse mit dem Programm KENOREST existieren. Dies gewährleistet eine Vergleichbarkeit der Mittelwerte. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tab. 4.2 und Abb. 4.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass für MOTIVE insbesondere bei den Aktinoiden eine Verbesserung in der Nachrechnung gegenüber KENOREST erzielt werden konnte. Dies gilt für die wichtigen Uran- und Plutonium-Nuklide und insbesondere auch für die Curium-Nuklide. Die erzielten Verbesserungen können grundsätzlich von Änderungen in den Berechnungsmethoden oder von Änderungen in den zugrundeliegenden nuklearen Daten herrühren. Da eine Trennung der einzelnen Effekte nicht ohne weiteres möglich ist, ist eine eindeutige Zuordnung schwierig. Ein wesentlicher Beitrag wird jedoch von der Verwendung neuerer Wirkungsquerschnittsdaten herrühren.

Bei den Spaltprodukten ergibt sich ein gemischtes Bild. Manche Spaltprodukte werden von MOTIVE besser berechnet, andere wiederum von KENOREST. Größere Unterschiede zwischen MOTIVE und KENOREST ergeben sich insbesondere bei  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Gd}$  und  $^{155}\text{Gd}$ . Hierbei ist allerdings die große Streubreite der Ergebnisse zu beachten die auf größere experimentelle Unsicherheiten hindeutet.

Der Vergleich der Ergebnisse von MOTIVE für die beiden unterschiedlichen hier betrachteten Probensätze macht außerdem deutlich, dass zumindest bei einigen Nukliden der erzielte Mittelwert nicht unwesentlich von der Auswahl der Proben abhängt. Das ist darauf zurückzuführen, dass einige Probenserien für bestimmte Nuklide ein deutliches Bias aufweisen, der dann auf den Mittelwert für den gesamten Probensatz durchschlägt.

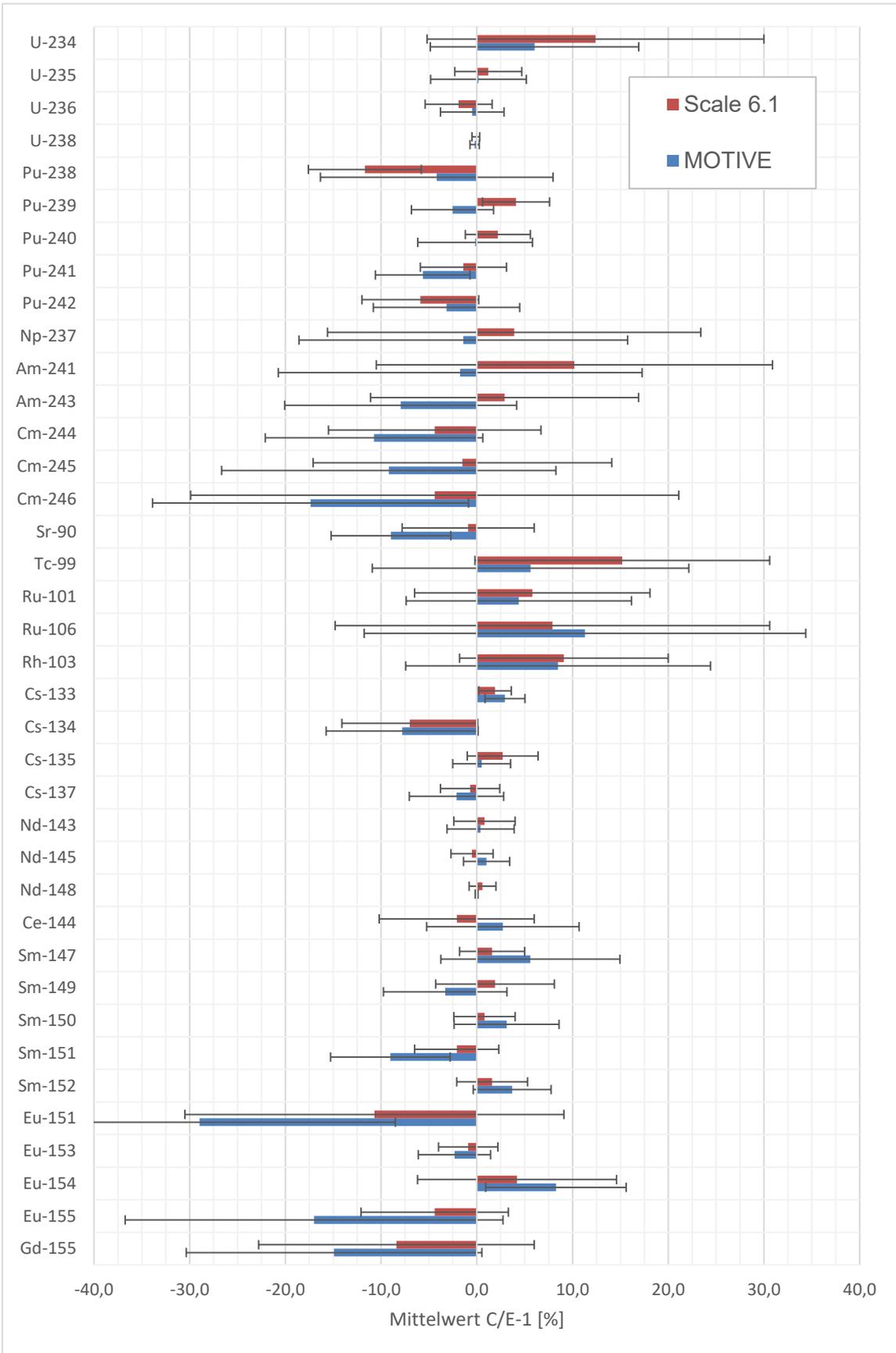
#### 4.1.2 Vergleich mit SCALE

Zur Validierung der in Code-Paket SCALE 6.1 /OAK 11/ enthaltenen Inventarberechnungsmethoden und der mitgelieferten ENDF/B-VII Wirkungsquerschnittsbibliothek wurde in /ILA 12/ ein zum vorliegenden Bericht vergleichbarer Datensatz an Nachrechnungen von Nachbestrahlungsanalyseproben publiziert. Die Rechnungen wurden da-

bei mit TRITON/NEWT und der 238-Gruppen-Bibliothek durchgeführt. Zur Einordnung der hier vorgestellten Ergebnisse wird im Folgenden ein Vergleich der Nachrechnungsergebnisse vorgenommen.

**Tab. 4.3** Tabelle der mit SCALE6.1 und ENDF/B-VII erzielten Nachrechnungsergebnisse. Aus /ILA 12/

Nuklid	# Proben	C/E - 1 Mittelwert	$\sigma$ (C/E - 1)	Nuklid	# Proben	C/E - 1 Mittelwert	$\sigma$ (C/E - 1)
<sup>234</sup> U	55	0,176	12,4	<sup>109</sup> Ag	6	0,746	77,3
<sup>235</sup> U	92	0,035	1,2	<sup>125</sup> Sb	18	0,466	99,6
<sup>236</sup> U	77	0,035	-1,9	<sup>133</sup> Cs	10	0,017	1,9
<sup>238</sup> U	92	0,004	-0,1	<sup>134</sup> Cs	59	0,071	-7
<sup>238</sup> Pu	77	0,059	-11,7	<sup>135</sup> Cs	16	0,037	2,7
<sup>239</sup> Pu	92	0,035	4,1	<sup>137</sup> Cs	73	0,031	-0,7
<sup>240</sup> Pu	92	0,034	2,2	<sup>143</sup> Nd	36	0,032	0,8
<sup>241</sup> Pu	92	0,045	-1,4	<sup>145</sup> Nd	36	0,022	-0,5
<sup>242</sup> Pu	91	0,061	-5,9	<sup>148</sup> Nd	77	0,014	0,6
<sup>237</sup> Np	36	0,195	3,9	<sup>144</sup> Ce	32	0,081	-2,1
<sup>241</sup> Am	39	0,207	10,2	<sup>147</sup> Sm	24	0,034	1,6
<sup>243</sup> Am	38	0,14	2,9	<sup>149</sup> Sm	20	0,062	1,9
<sup>244</sup> Cm	57	0,111	-4,4	<sup>150</sup> Sm	24	0,032	0,8
<sup>245</sup> Cm	24	0,156	-1,5	<sup>151</sup> Sm	24	0,044	-2,1
<sup>246</sup> Cm	14	0,255	-4,4	<sup>152</sup> Sm	24	0,037	1,6
<sup>90</sup> Sr	15	0,069	-0,9	<sup>151</sup> Eu	12	0,198	-10,7
<sup>99</sup> Tc	20	0,154	15,2	<sup>153</sup> Eu	19	0,031	-0,9
<sup>101</sup> Ru	7	0,123	5,8	<sup>154</sup> Eu	44	0,104	4,2
<sup>106</sup> Ru	31	0,227	7,9	<sup>155</sup> Eu	11	0,077	-4,4
<sup>103</sup> Rh	8	0,109	9,1	<sup>155</sup> Gd	19	0,144	-8,4



**Abb. 4.3** Vergleich der gemittelten C/E-1 Werte für MOTIVE und SCALE6.1

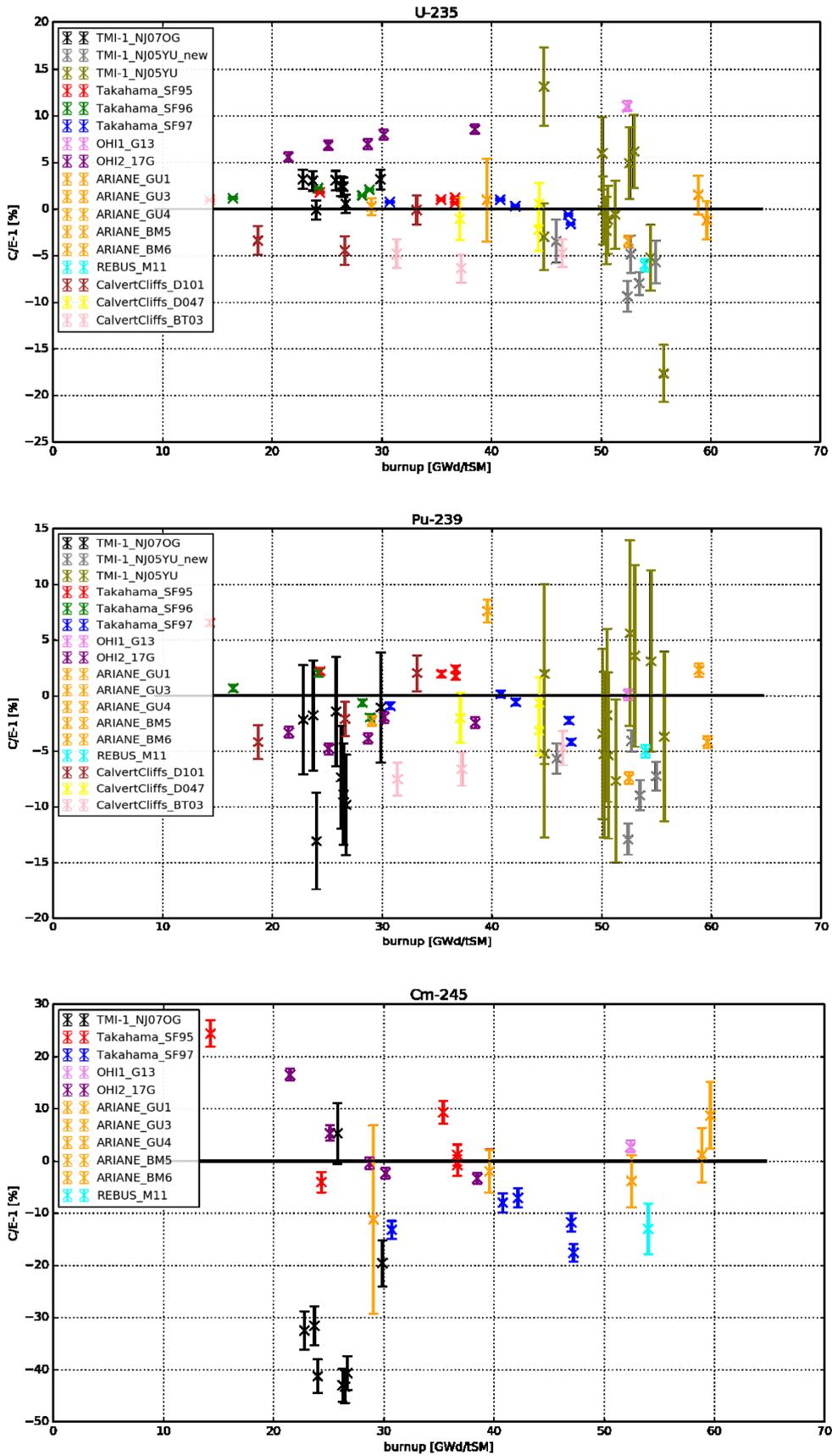


Abb. 4.4 Abbrandabhängige Darstellung der Nachrechnungsergebnisse: Aktinoiden

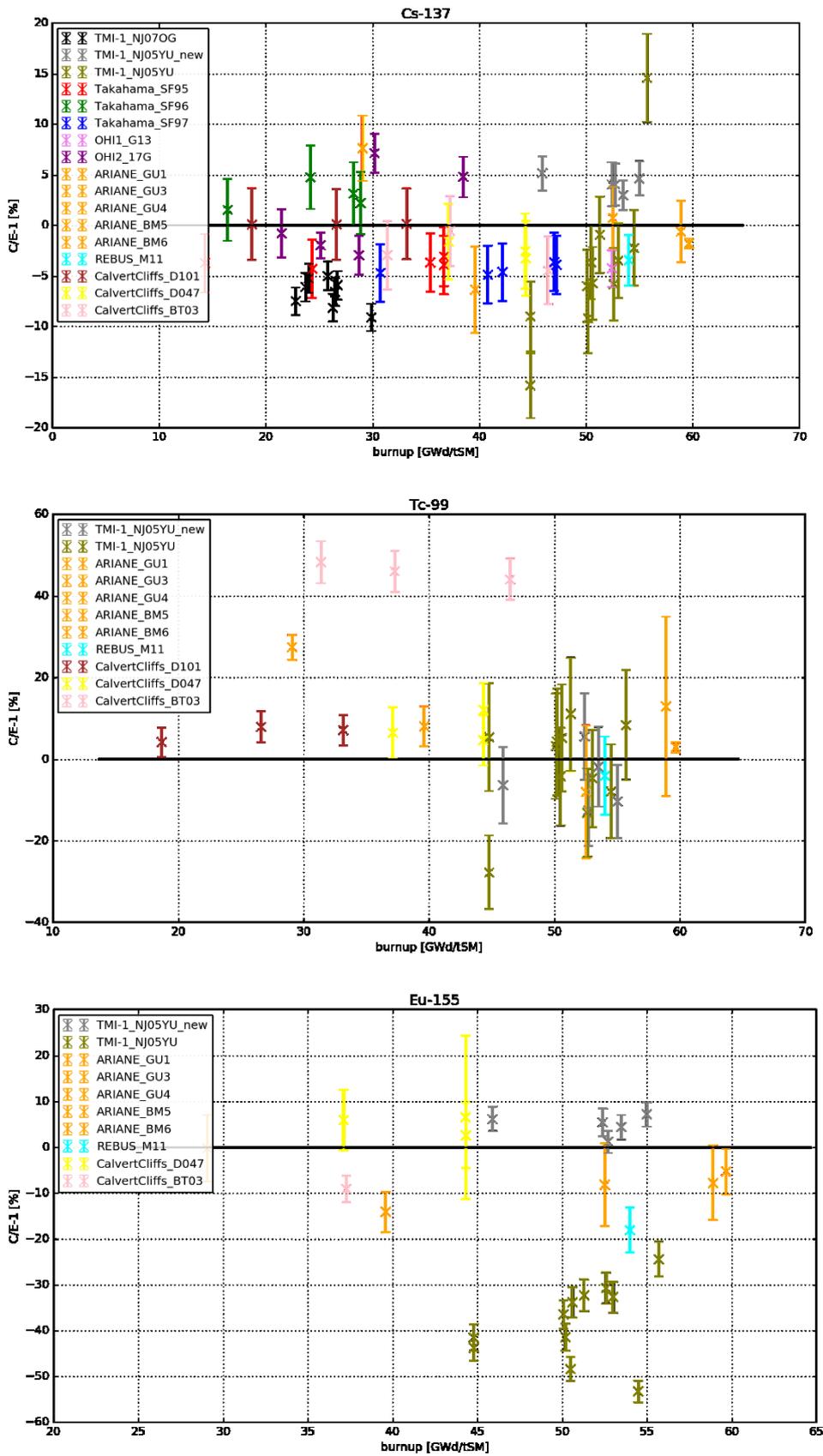


Abb. 4.5 Abbrandabhängige Darstellung der Nachrechnungsergebnisse: Spaltprodukte

Die mit SCALE 6.1 erzielten Ergebnisse sind in Tab. 4.3 dargestellt. Der Datensatz umfasst insgesamt 92 Proben und ist somit etwas größer als der hier vorgestellte Probenatz. Von den im vorliegenden Bericht analysierten Proben wurden in /ILA 12/ die Proben aus den Reaktoren TMI-1, Takahama-3, Calvert Cliffs, Gösgen und GKN-II untersucht. Zusätzlich wurden Proben aus den Reaktoren Trino Vercellese, Obrigheim, Turkey Point-3, und H. B. Robinson-2 berücksichtigt. Bei einer der Proben aus Gösgen handelt es sich um eine Probe aus dem proprietären MALIBU Programm, das der GRS nicht zur Verfügung steht. Der Vergleich zwischen den nuklidweisen Mittelwerten der C/E-1-Werte von MOTIVE und SCALE 6.1 unter Berücksichtigung der Standardabweichungen ist in Abb. 4.3 gezeigt. Aufgrund der unterschiedlichen zugrundeliegenden Datensätze hat der Vergleich eine geringfügig eingeschränkte Aussagekraft. Unterschiede bei einzelnen Nukliden sollten nicht überbewertet werden. Insgesamt sind die Nachrechnungsergebnisse für beide Programme von vergleichbarer Qualität. Die Nachrechnung der Isotope von Uran, Plutonium und Neptunium scheint bei MOTIVE geringfügig besser zu sein, während bei Americium und Curium SCALE etwas bessere Ergebnisse erzielt. Bei den Spaltprodukten ergibt sich kein eindeutiger Vorteil für eines der beiden Verfahren. Auffällig sind allerdings die geringeren Abweichungen der SCALE-Ergebnisse bei Europium und Gadolinium. Aufgrund der großen Streubreite der Ergebnisse für diese Nuklide kann hier aber auch der Einfluss der Probenauswahl eine deutliche Rolle spielen, d.h. bei den nachgerechneten Proben hat sich möglicherweise zufällig eine bessere Übereinstimmung ergeben.

In Abb. 4.4 und Abb. 4.5 ist eine Auftragung der Nachrechnungsergebnisse über dem Abbrand für einzelne Nuklide beispielhaft gezeigt. Diese Darstellung ermöglicht einerseits das Auffinden von systematischen Bias und Trends in der Nachrechnung und kann außerdem dazu dienen einzelne Probenserien zu identifizieren die eventuell mit einem systematischen Fehler behaftet ist.

Für  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  ist jeweils eine Streuung der Ergebnisse um die „Nulllinie“ herum zu erkennen. Auffällig ist die große Streuung der Werte der von ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU aus TMI-1. Bei  $^{245}\text{Cm}$  zeigt sich ein negatives Bias der vor allem von den NJ07OG-Proben aus TMI-1 herrührt. Bei den Spaltprodukten ist für  $^{137}\text{Cs}$  wiederum die Streuung der Werte um Null herum ohne erkennbare systematische Effekte zu sehen.  $^{99}\text{Tc}$  hat ein deutliches positives Bias, ohne dass ein Trend über den Abbrand zu erkennen ist. Auffällig ist die große Abweichung der drei Werte des Brennelements BT03 von Calvert Cliffs. Das Diagramm für  $^{155}\text{Eu}$  lässt vor allem erkennen, dass die ANL-Proben des Brennelements NJ05YU aus TMI-1 deutlich von den

anderen Werten abweichen. Hier zeigt sich besonders deutlich der Effekt, dass das Weglassen einzelner experimenteller Serien zu deutlich anderen Ergebnissen führen kann.

## 4.2 SWR

Da alle bisher nachgerechneten SWR-Proben aus einem Brennelement stammen und deren Analyse von einem Labor durchgeführt wurde, ist die Aussagekraft der Nachrechnungen hier noch begrenzt. Systematisch bedingte Trends sind nicht auszuschließen und insbesondere so nicht quantifizierbar. Die Ergebnisse umfassen einen Satz von 15 Proben. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse sind in Tab. 4.4 und Abb. 4.6 dargestellt. Aus der Darstellung lässt sich entnehmen, dass die Qualität der Ergebnisse vergleichbar mit der der DWR-Proben ist. Mit Ausnahme von  $^{238}\text{Pu}$  werden die Isotope von Uran und Plutonium alle im Bereich von  $\pm 5\%$  getroffen. Für Neodym, Cäsium, Cer, Samarium und Europium liegen die Ergebnisse größtenteils in einer ähnlichen Größenordnung. Die höheren Aktinoiden werden systematisch unterschätzt.

**Tab. 4.4** Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle SWR-Proben

<b>Nuklid</b>	<b># Proben</b>	<b>C/E - 1 Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math> C/E - 1</b>
<sup>234</sup> U	15	5,3	4,3
<sup>235</sup> U	15	4,7	4,7
<sup>236</sup> U	15	1,7	1,1
<sup>238</sup> U	6	0,1	0,1
<sup>237</sup> Np	15	0,1	9,3
<sup>238</sup> Pu	15	11,5	10,4
<sup>239</sup> Pu	15	-3,3	4,5
<sup>240</sup> Pu	15	-4,2	2,6
<sup>241</sup> Pu	15	-0,1	3,7
<sup>242</sup> Pu	15	0,4	3,8
<sup>241</sup> Am	15	-9,2	10,9
<sup>242m1</sup> Am	15	-26,9	7,1
<sup>243</sup> Am	15	-5,5	3,5
<sup>242</sup> Cm	15	-46,6	15,4
<sup>243</sup> Cm	15	-6,6	9,6
<sup>244</sup> Cm	15	-9,1	5,3
<sup>245</sup> Cm	15	-10,0	11,0
<sup>246</sup> Cm	13	-27,7	19,5
<sup>247</sup> Cm	4	-65,2	25,7
<sup>134</sup> Cs	15	-8,8	5,3
<sup>137</sup> Cs	15	-5,0	2,9
<sup>144</sup> Ce	13	-0,6	14,2
<sup>143</sup> Nd	15	-0,9	1,0
<sup>144</sup> Nd	15	-5,0	10,2
<sup>145</sup> Nd	15	0,9	0,7
<sup>146</sup> Nd	15	-0,9	0,5
<sup>148</sup> Nd	15	0,2	0,2
<sup>150</sup> Nd	15	-0,1	0,6
<sup>147</sup> Sm	11	-4,4	3,4
<sup>148</sup> Sm	11	-13,5	3,4
<sup>149</sup> Sm	11	-2,8	13,7
<sup>150</sup> Sm	11	-4,7	3,3
<sup>151</sup> Sm	11	-8,7	4,5
<sup>152</sup> Sm	11	-3,1	4,0
<sup>154</sup> Sm	11	-6,2	4,5
<sup>154</sup> Eu	15	0,1	4,5

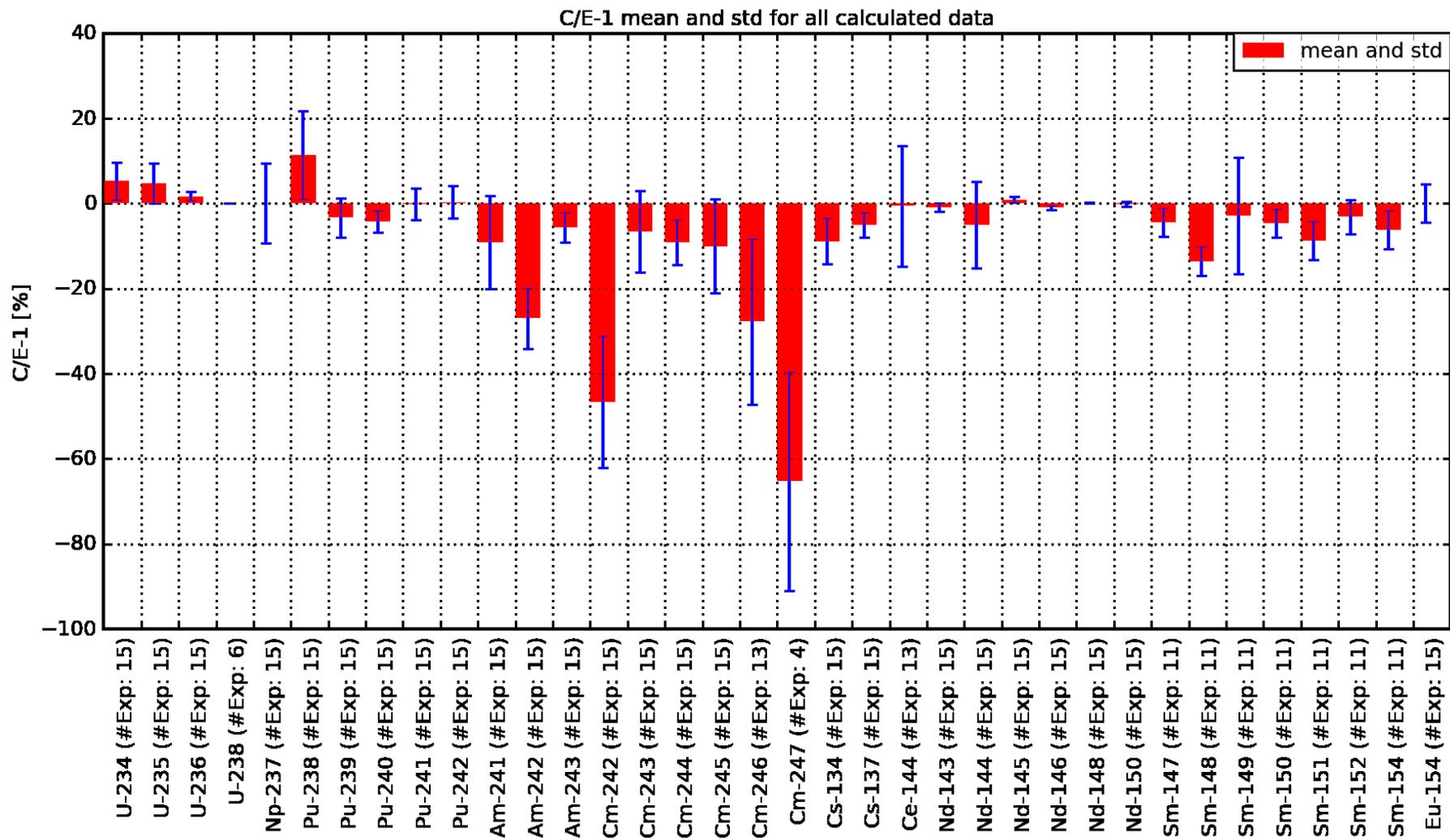
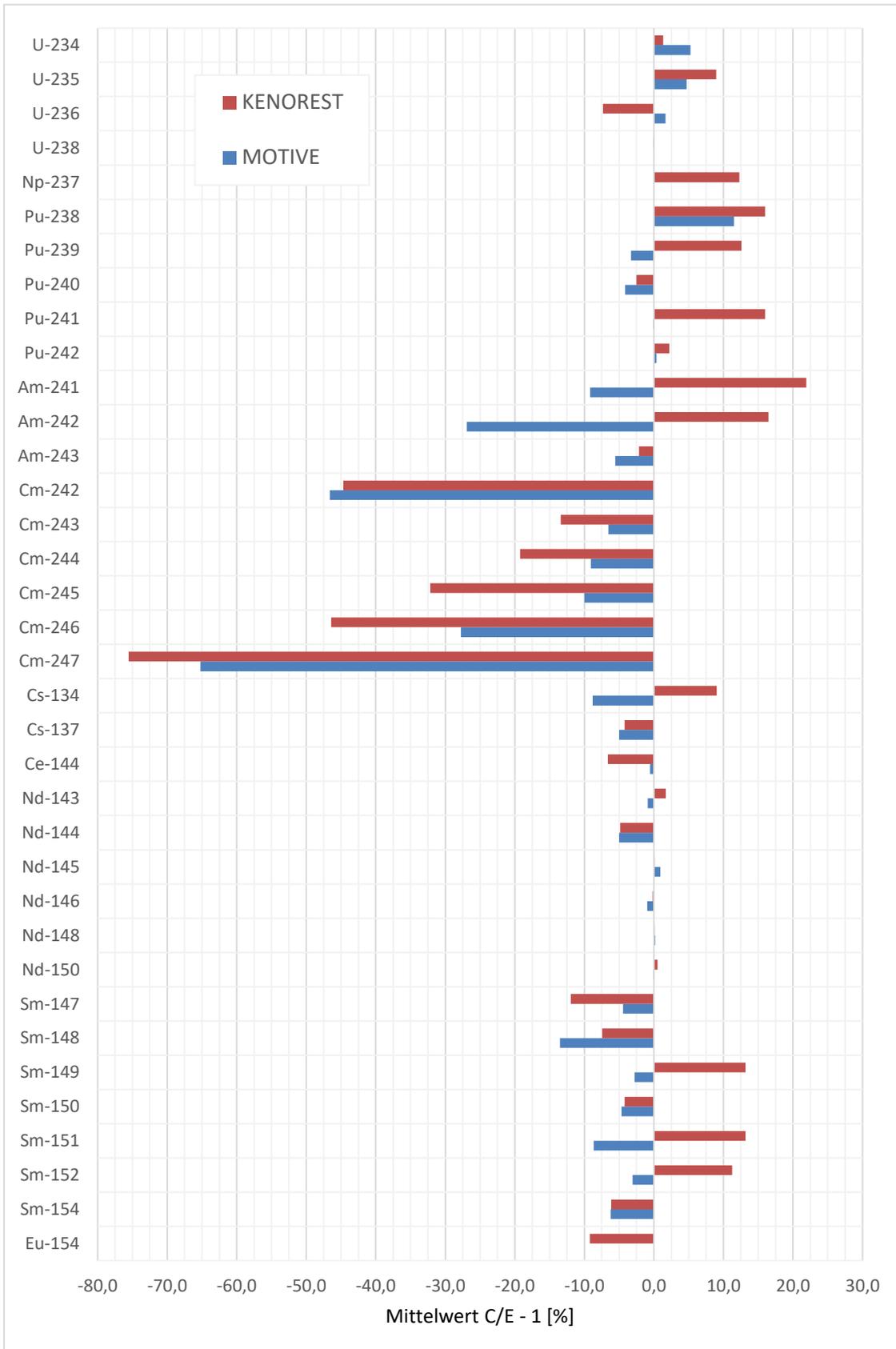


Abb. 4.6 Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle SWR-Proben



**Abb. 4.7** Vergleich der Nachrechnungsergebnisse für die SWR-Proben zwischen MOTIVE und KENOREST

Beim Vergleich der Nachrechnungsergebnisse zeigen sich deutliche Verbesserungen der MOTIVE Ergebnisse gegenüber den KENOREST Ergebnissen, insbesondere bei Uran und Plutonium und den höheren Aktinoiden. Wie schon für die DWR-Nachrechnungen diskutiert ist eine eindeutige Zuordnung dieser Verbesserungen zu einzelnen Effekten schwierig. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass ein wesentlicher Beitrag hierzu von Verbesserungen in den Wirkungsquerschnittsdaten herrührt. Bei den Spaltprodukten ist das Ergebnis weniger eindeutig. Allerdings zeigen sich auch hier Verbesserungen bei wichtigen Nukliden wie  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{149}\text{Sm}$ .

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Der vorliegende Bericht fasst den aktuellen Stand der Validierungsrechnungen für das in der GRS entwickelte Abbrand- und Inventarberechnungsprogramm MOTIVE zusammen. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden mit der Version v0.6.1 und ENDF/B-VII.1 Wirkungsquerschnittsdaten unter Verwendung von KENO-VI aus SCALE 6.2.2 erstellt. Mit den im vorhergehenden Kapitel gezeigten Vergleichen konnte gezeigt werden, dass die mit MOTIVE erzielte Ergebnisqualität vergleichbar mit denjenigen etablierter Programmsysteme ist. MOTIVE ersetzt künftig das bei der GRS in der Vergangenheit entwickelte Programmsystem KENOREST. Im Vergleich zu diesem konnte mit MOTIVE, insbesondere bei den Aktinoiden, eine Verbesserung bei der Probenachrechnung erzielt werden.

Der Aufbau der Validierungsdatenbasis für MOTIVE ist ein kontinuierlicher Prozess, der mit dem hier vorgelegten Bericht noch nicht abgeschlossen ist. Die Datenbank SFCOMPO2.0 stellt noch einige weitere Nachbestrahlungsanalyseproben bereit, die bisher noch nicht mit MOTIVE nachgerechnet wurden. Insbesondere bei den SWR-Proben kann der bisher erreichte Umfang des Validierungsdatensatzes als noch nicht ausreichend angesehen werden. Es ist daher geplant, die hier vorgestellten Arbeiten weiterzuführen, um die Validierungsdatenbasis zu vervollständigen.

Neben der korrekten Berechnung des Nuklidinventars sind auch daraus abgeleitete Ergebnisgrößen von großem Interesse bei der Abbrandberechnung. Daher sind solche abgeleiteten Größen soweit möglich ebenfalls einer Validierung zu unterziehen. Der nächste geplante Schritt in dieser Richtung ist die Validierung der Berechnung der Nachzerfallsleistung mit MOTIVE.



## Literaturverzeichnis

- /BEC 02/ Bechtel SAIC Company: Three Mile Island Unit 1 Radiochemical Assay Comparisons to SAS2H Calculations. Office of Civilian Radioactive Waste, CAL-UDC-NU-000011, Rev. A: Las Vegas, NV, 2002.
- /BEH 14/ Behler, M., Hannstein, V., Kilger, R., Moser, F.-E., Pfeiffer, A., Stuke, M.: Quantifizierung der Rechengenauigkeit von Codesystemen zum Abbrandkredit durch Experimentnachrechnungen. GRS, Bd. 336, 196 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2014.
- /BIE 94/ Bierman, S. R., Talbert, R. J.: Benchmark data for validating irradiated fuel compositions used in criticality calculations. Hrsg.: U.S. Department of Energy, PNL-10045, 76 S., DOI 10.2172/10193492, October 1994.
- /BIE 09/ Biennu, P., Ferreux, L., Androletti, G., Arnal, N., Lépy, M.-C., Bé, M.-M.: Determination of  $^{126}\text{Sn}$  half-life from ICP-MS and gamma spectrometry measurements. Bd. 97, DOI 10.1524/ract.2009.1673, 2009.
- /GUE 88a/ Guenther, R. B., Blahnik, D. E., Campbell, T. K., Jenquin, U. P., Mendel, L. E., Thomas, L. E., Thornhill, C. K.: Characterization of Spent Fuel Approved Testing Material-ATM-103. Pacific Northwest Laboratory (PNL), PNL-5109-103, 273 S., April 1988.
- /GUE 88b/ Guenther, R. B., Blahnik, D. E., Campbell, T. K., Jenquin, U. P., Mendel, L. E., Thornhill, C. K.: Characterization of Spent Fuel Approved Testing Material-ATM-106. Pacific Northwest Laboratory (PNL), PNL-5109-106, 330 S., October 1988.
- /GUE 91/ Guenther, R. J., Blahnik, D. E., Jenquin, U. P., Mendel, J. E., Thomas, L. E., Thornhill, C. K.: Characterization of spent fuel approved testing material-ATM-104. Pacific Northwest Laboratory (PNL), PNL-5109-104, 416 S., DOI 10.2172/138327, Dezember 1991.

- /ILA 10/ Ilas, G., Gauld, I. C., Difilippo, F. C., Emmett, M. B.: Analysis of Experimental Data for High Burnup PWR Spent Fuel Isotopic Validation – Calvert Cliffs, Takahama, and Three Mile Island Reactors. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), NUREG/CR-6968, ORNL/TM-2008/071, 134 S., February 2010.
- /ILA 12/ Ilas, G., Gauld, I. C., Radulescu, G.: Validation of new depletion capabilities and ENDF/B-VII data libraries in SCALE. Annals of Nuclear Energy, Bd. 46, S. 43–55, DOI 10.1016/j.anucene.2012.03.012, 2012.
- /INT 07/ International Association for the Properties of Water and Steam: Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. 49 S.: Lucerne, Switzerland, August 2007.
- /JÖR 10/ Jörg, G., Bühnemann, R., Hollas, S., Kivel, N., Kossert, K., van Winkel, S., Gostomski, C. L. v.: Preparation of radiochemically pure <sup>79</sup>Se and highly precise determination of its half-life. Applied Radiation and Isotopes, Bd. 68, Nr. 12, S. 2339–2351, DOI 10.1016/j.apradiso.2010.05.006, 2010.
- /KER 15/ Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG (Hrsg.): Kernkraftwerk Gösgen, Technik und Betrieb. 2. Aufl., 73 S., 2015.
- /KIL 08a/ Kilger, R., Hesse, U., Langenbuch, S.: Isotopic inventory calculations taking into account 2D/3D environment conditions during fuel irradiation. In: American Nuclear Society (ANS) (Hrsg.): International Conference on the Physics of Reactors, “Nuclear Power: A Sustainable Resource”. PHYSOR, Interlaken, Switzerland, September 14-19, 2008.
- /KIL 08b/ Kilger, R., Hesse, U., Langenbuch, S.: KENOREST Nachrechnung der Nuklidinventare von Nachbestrahlungsproben aus dem ARIANE Programm. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3428, 69 S., Mai 2008.

- /LEB 03/ Lebenhaft, J. R., Trelue, H. R.: Validation of MonteBurns for MOX Fuel using ARIANE Experimental Results. In: American Nuclear Society (ANS) (Hrsg.): Proceedings of Nuclear Mathematical and Computational Sciences (M&C 2003). Nuclear Mathematical and Computational Sciences (M&C 2003), Gatlinburg, TN, USA, 6. - 11. April 2003: La Grange Park, IL, USA, 2003.
- /MAC 04/ Macian, R., Zimmermann, M. A., Chawla, R.: Assessment of CASMO-4 predictions of the isotopic inventory of high burn-up MOX fuel. In: American Nuclear Society (ANS) (Hrsg.): Proceedings of PHYSOR 2004. PHYSOR 2004: The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems - Global Developments, Chicago, IL, USA, 25. - 29. April 2004, ISBN 0-89448683-7: La Grange Park, IL, USA, 2004.
- /MAG 18/ Magill, J., Dreher, R., Sóti, Z.: Karlsruher Nuklidkarte. 10. Aufl., ISBN 978-3-943868-50-0, Nucleonica, 2018.
- /MER 10/ Mertzyurek, U., Francis, M. W., Gauld, I. C.: SCALE 5 Analysis of BWR Spent Nuclear Fuel Isotopic Compositions for Safety Studies. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), ORNL/TM-2010/286, ORNL/TM-2010/286, 103 S., December 2010.
- /MIC 17/ Michel-Sendis, F., Gauld, I. C., MARTINEZ, J. S., Alejano, C., Bossant, M., Boulanger, D., Cabellos, O., Chrapciak, V., Conde, J., Fast, I., Gren, M., Govers, K., Gysemans, M., Hannstein, V., et al.: SFCOMPO-2.0, An OECD NEA database of spent nuclear fuel isotopic assays, reactor design specifications, and operating data. Annals of Nuclear Energy, Bd. 110, S. 779–788, DOI 10.1016/j.anucene.2017.07.022, 2017.
- /OAK 11/ Oak Ridge National Laboratory (ORNL): SCALE -A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, Juni 2011. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-785.
- /PAT 82/ Pati, S. R., VanSaun, P. A.: Isotopics and Transuranic Nuclide Content of Three- and Four-Cycle Calvert Cliffs-I Fuel. EPRI, 34 S., December 1982.

- /PET 16/ Petrie, L. M., Lefebvre, R. A., Wiarda, D.: Standard Composition Library. In: Rearden, B. T., Jessee, M. A. (Hrsg.): SCALE Code System. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1: Oak Ridge, Tennessee, August 2016. Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834.
- /PRI 03/ Primm, R. T.: ARIANE International Programme, Final Report. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), ORNL/SUB/97-XSV750-1, 539 S.: Oak Ridge TN, USA, May 2003.
- /RAD 10/ Radulescu, G., Gauld, I. C., Ilas, G.: SCALE 5.1 Predictions of PWR Spent Nuclear Fuel Isotopic Compositions. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 233 S., DOI 10.2172/983556, 2010.
- /REA 17/ Rearden, B. T., Jessee, M. A. (Hrsg.): SCALE Code System. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.2, 2747 S.: Oak Ridge, Tennessee, Februar 2017. Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834.
- /ROD 86/ Roddy, J. W., Claiborne, H. C., Ashline, R. C., Johnson, P. J., Rhyne, B. T.: Physical and decay characteristics of commercial LWR spent fuel. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), ORNL/TM-9591/V1&R1, 163 S., DOI 10.2172/6105618, 1986.
- /SAN 03/ Sanders, C. E., Gauld, I. C.: Isotopic Analysis of High-Burnup PWR Spent Fuel Samples From the Takahama-3 Reactor. U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC), NUREG/CR-6798, 81 S., 2003.
- /SCK 04/ SCK-CEN: REBUS International Program - Reactivity Tests for a Direct Evaluation of the Burnup Credit on Selected Irradiated LWR Fuel Bundles, Gamma Spectroscopy PIE on Irradiated GKN II Fuel Rods. SCK-CEN, Belgonucleaire, RE 2004/29, 52 S., Dezember 2004.
- /SCK 05a/ SCK-CEN: REBUS International Program - Reactivity Tests for a Direct Evaluation of the Burnup Credit on Selected Irradiated LWR Fuel Bundles, VENUS Fuel Characterisation Report. SCK-CEN, Belgonucleaire, RE 2001/13, Rev. C, 14 S., Dezember 2005.

- /SCK 05b/ SCK-CEN: REBUS International Programme PWR - Reactivity Tests for a Direct Evaluation of the Burnup Credit on Selected Irradiated LWR Fuel Bundles, Fuel Irradiation History Report. SCK-CEN, Belgonucleaire, RE 2002/18, Rev. B, 20 S., Juni 2005.
- /SCK 06/ SCK-CEN: REBUS International Program - Reactivity Tests for a Direct Evaluation of the Burnup Credit on Selected Irradiated LWR Fuel Bundles, Destructive Radiochemical Spent Fuel Characterization of a PWR UO<sub>2</sub> Fuel Sample. SCK-CEN, Belgonucleaire, RE 2005/35, Rev. A, 31 S., Mai 2006.
- /SUY 11/ Suyama, K., Murazaki, M., Ohkubo, K., Nakahara, Y., Uchiyama, G.: Re-evaluation of Assay Data of Spent Nuclear Fuel obtained at Japan Atomic Energy Research Institute for validation of burnup calculation code systems. *Annals of Nuclear Energy*, Bd. 38, Nr. 5, S. 930–941, DOI 10.1016/j.anucene.2011.01.025, 2011.
- /TAL 01/ Talbert, R. J., Grady-Raap, M. C.: *Compilation of Radiochemical Analyses of Spent Nuclear Fuel Samples*. Pacific Northwest National Lab (PNNL), PNNL-13677, 38 S., DOI 10.2172/789918: Richland, Washington, September 2001.
- /WIM 01/ Wimmer, L. B.: *Summary Report of Commercial reactor Criticality Data for Three Mile Island Unit 1*, Technical Report. Yucca Mountain Project, TDR-UDC-NU-000004, Rev. 01, DOI 10.2172/789897: Las Vegas, Nevada, 29. August 2001.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der Brennelemente G13 und 17G aus Ohi-1 und Ohi-2 (aus SFCOMPO 2.0) .....	5
Abb. 2.2	Bestrahlungsgeschichte der Probe 91E07 des Brennelements G13 aus Ohi-1 .....	11
Abb. 2.3	Bestrahlungsgeschichte der Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 des Brennelements 17G aus Ohi-2 .....	13
Abb. 2.4	Implementierung der Brennelemente in SCALE-Geometrie .....	17
Abb. 2.5	Ohi-1, Probe 91E07: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	23
Abb. 2.6	Ohi-2 Proben: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	24
Abb. 2.7	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über alle Proben von Ohi-2 .....	25
Abb. 2.8	Schematische Darstellung der Brennelemente NT3G23 und NT3G24 aus Takahama-3 .....	26
Abb. 2.9	Bestrahlungsgeschichte der Brennstäbe SF95-1, SF96-1, und SF97-1 .....	37
Abb. 2.10	Geometrie-Modell der Brennelemente der Takahama-3 Proben .....	41
Abb. 2.11	Takahama-3, SF95: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	46
Abb. 2.12	Takahama-3, SF96: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	47
Abb. 2.13	Takahama-3, SF97: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	48
Abb. 2.14	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben SF95-2 bis SF95-5 .....	49
Abb. 2.15	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben SF96-2 bis SF96-5 .....	50
Abb. 2.16	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben SF97-2 bis SF97-6 .....	51
Abb. 2.17	Schematische Darstellung der Brennelemente NJ05YU und NJ070G aus TMI-1 .....	53

Abb. 2.18	Bestrahlungsgeschichte der Proben aus Brennstab D5 des Brennelements NJ05YU .....	63
Abb. 2.19	Bestrahlungsgeschichte der Proben aus Brennstab H5 des Brennelements NJ05YU .....	63
Abb. 2.20	Bestrahlungsgeschichte der Proben aus den Brennstäben O1, O12 und O13 des Brennelements NJ070G .....	64
Abb. 2.21	Implementierung der Brennelemente NJ05YU und NJ070G in SCALE-Geometrie .....	71
Abb. 2.22	TMI-1, NJ070G: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	76
Abb. 2.23	TMI-1, NJ05YU: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent für die von ANL gemessenen Proben.....	77
Abb. 2.24	TMI-1, NJ05YU: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent für die von ORNL gemessenen Proben.....	78
Abb. 2.25	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben des Brennelements NJ070G.....	79
Abb. 2.26	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die von ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU .....	80
Abb. 2.27	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die von ORNL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU .....	81
Abb. 2.28	Schematische Darstellung des Brennelements 12-40 aus dem Reaktor Gösigen /PRI 03/.....	84
Abb. 2.29	Schematische Darstellung der Brennelemente 1601 (links) und 1701 (rechts) aus dem Reaktor Gösigen /PRI 03/ .....	84
Abb. 2.30	Tausch von Brennstäben im Brennelement 12-40 mit den jeweiligen Stababbränden nach /PRI 03/.....	93
Abb. 2.31	Brennstabbelegung im Rechenmodell für das Brennelement 12-40 aus dem Reaktor Gösigen .....	104
Abb. 2.32	Schematische Darstellung des KENO-VI-Geometriemodells für das Brennelement 12-40 aus dem Reaktor Gösigen .....	105

Abb. 2.33	ARIANE, GU1: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	117
Abb. 2.34	ARIANE, GU3': Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	118
Abb. 2.35	ARIANE, GU4: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	119
Abb. 2.36	Schematische Darstellung des Brennelements M308 aus dem Beznau-I /PRI 03/ .....	121
Abb. 2.37	Brennstabbelegung im detaillierten Rechenmodell für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I .....	142
Abb. 2.38	Brennstabbelegung im vereinfachten Rechenmodell für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I .....	143
Abb. 2.39	Schematische Darstellung der KENO-VI-Geometriemodelle für das detaillierte (links) und vereinfachte (rechts) Rechenmodell für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I .....	143
Abb. 2.40	ARIANE, BM5': Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	156
Abb. 2.41	ARIANE, BM6: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	157
Abb. 2.42	Schematische Darstellung des Brennelements 419 aus GKN-II /SCK 05b/ .....	159
Abb. 2.43	Brennstabbelegung im detaillierten Rechenmodell für das Brennelement 419 aus GKN-II .....	175
Abb. 2.44	Brennstabbelegung im vereinfachten Rechenmodell für das Brennelement 419 aus GKN-II .....	175
Abb. 2.45	Schematische Darstellung der KENO-VI-Geometriemodelle für das detaillierte (links) und vereinfachte (rechts) Rechenmodell für das Brennelement 419 aus GKN-II .....	176
Abb. 2.46	REBUS, M11: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	185
Abb. 2.47	Brennelementgeometrien der Brennelemente BT03 (links) sowie D047 und D101 (rechts) aus Calvert Cliffs-1 (aus SFCOMPO 2.0) .....	187
Abb. 2.48	KENO-VI Modell des Calvert Cliffs Brennelements BT03. Links Brennelement mit abbrennbaren Absorberstäben, rechts mit gezogenen Absorberstäben .....	201

Abb. 2.49	Nachrechnungsergebnisse in der Form C/E-1 in Prozent für die Proben des Brennelements D101 .....	205
Abb. 2.50	Nachrechnungsergebnisse in der Form C/E-1 in Prozent für die Proben des Brennelements D047 .....	206
Abb. 2.51	Nachrechnungsergebnisse in der Form C/E-1 in Prozent für die Proben des Brennelements BT03 .....	207
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Brennelements aus Fukushima-Daini-2 /MIC 17/ .....	210
Abb. 3.2	Bestrahlungsgeschichte der Proben des Brennelements SF98.....	217
Abb. 3.3	Implementierung der Brennelemente in SCALE-Geometrie .....	222
Abb. 3.4	Fukushima Daini-2, SF98: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	227
Abb. 3.5	Fukushima Daini-2, SF99: Vergleich zwischen Rechnung und experimentellen Daten dargestellt als C/E-1 in Prozent .....	228
Abb. 3.6	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben des Brennelements SF98 .....	229
Abb. 3.7	Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen für die Mittelung über die Proben des Brennelements SF99 .....	230
Abb. 4.1	Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle DWR-Proben.....	233
Abb. 4.2	Vergleich C/E-1 für MOTIVE und KENOREST.....	235
Abb. 4.3	Vergleich der gemittelten C/E-1 Werte für MOTIVE und SCALE6.1 .....	238
Abb. 4.4	Abbrandabhängige Darstellung der Nachrechnungsergebnisse: Aktinoiden.....	239
Abb. 4.5	Abbrandabhängige Darstellung der Nachrechnungsergebnisse: Spaltprodukte .....	240
Abb. 4.6	Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle SWR-Proben.....	244
Abb. 4.7	Vergleich der Nachrechnungsergebnisse für die SWR-Proben zwischen MOTIVE und KENOREST .....	245

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Liste der im Rahmen des Berichts untersuchten Nachbestrahlungsanalyseproben.....	2
Tab. 2.1	Geometrische Abmessungen der Brennelemente G13 und 17G.....	6
Tab. 2.2	Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre.....	6
Tab. 2.3	Relevante Details der 6 Proben aus Ohi-1 und Ohi-2 .....	7
Tab. 2.4	Daten zur Materialzusammensetzung des Brennstoffs .....	7
Tab. 2.5	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der UO <sub>2</sub> Brennstäbe .....	7
Tab. 2.6	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Brennstäbe .....	8
Tab. 2.7	Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturmaterials Zirkaloy-4.....	9
Tab. 2.8	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 4 bis 7 für die eine Probe aus Ohi-1 .....	10
Tab. 2.9	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 und 6 für die fünf Proben aus Ohi-2.....	12
Tab. 2.10	Nuklidzusammensetzung (zur Reaktorabschaltung) und Spaltprodukte (nach 5 Jahren Abklingzeit) der Probe 91E07 des Brennelements G13 aus Ohi-1.....	14
Tab. 2.11	Nuklidzusammensetzung (zur Reaktorabschaltung) für die Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 des Brennelements 17G aus Ohi-2 (Aktinoide).....	15
Tab. 2.12	Nuklidzusammensetzung (nach 5 Jahren Abklingzeit) für die Proben 89G01, 89G03, 89G05, 89G08, und 89G10 des Brennelements 17G aus Ohi-2 (Spaltprodukte).....	16
Tab. 2.13	Parameter der Abbrandrechnung.....	18
Tab. 2.14	Liste der betrachteten Nuklide .....	18
Tab. 2.15	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für Ohi-1 und Ohi-2 .....	21
Tab. 2.16	Mittelwert und Standardabweichung bei Mittelung der Proben aus Ohi-2.....	22

Tab. 2.17	Geometrische Abmessungen der Brennelemente G13 und 17G /MIC 17/, /SUY 11/.....	27
Tab. 2.18	Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre /MIC 17/, /SUY 11/ .....	28
Tab. 2.19	Relevante Details der Brennstäbe SF95, SF96 und SF97 .....	28
Tab. 2.20	Relevante Details der Proben des Brennstabs SF95 .....	28
Tab. 2.21	Relevante Detail der Proben des Brennstabs SF96 .....	29
Tab. 2.22	Relevante Detail der Proben des Brennstabs SF97 .....	29
Tab. 2.23	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberbrennstäbe .....	30
Tab. 2.24	Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-4.....	31
Tab. 2.25	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 und 6 für die Proben aus Brennstab SF95 .....	32
Tab. 2.26	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 und 6 für die Proben aus Brennstab SF96 .....	34
Tab. 2.27	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 bis 7 für die Proben aus Brennstab SF97.....	35
Tab. 2.28	Nuklidzusammensetzung aller gemessener Nuklide zur Reaktorabschaltung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennstabs SF95 .....	38
Tab. 2.29	Nuklidzusammensetzung aller gemessener Nuklide zur Reaktorabschaltung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennstabs SF96 .....	39
Tab. 2.30	Nuklidzusammensetzung aller gemessener Nuklide zur Reaktorabschaltung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennstabs SF97 .....	40
Tab. 2.31	Liste der betrachteten Nuklide .....	42
Tab. 2.32	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für die Stäbe SF95 und SF96.....	44
Tab. 2.33	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % .....	45
Tab. 2.34	Geometrische Abmessungen der Brennelemente NJ05YU und NJ070G .....	54

Tab. 2.35	Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre und Absorberstäbe .....	54
Tab. 2.36	Relevante Details der Proben des Brennstabs D5 des Brennelements NJ05YU .....	55
Tab. 2.37	Relevante Details der Proben des Brennstabs H6 des Brennelements NJ05YU .....	55
Tab. 2.38	Relevante Details der Proben der Brennstäbe O1, O12, und O13 des Brennelements NJ070G.....	55
Tab. 2.39	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberbrennstäbe in [Gew.%].....	56
Tab. 2.40	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Brennstäbe und der gadoliniumhaltigen Absorberbrennstäbe in Kernzahldichten .....	57
Tab. 2.41	Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-4.....	58
Tab. 2.42	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 9 und 10 für die Proben aus Stab D5 aus dem Brennelement NJ05YU in MW/tSM .....	59
Tab. 2.43	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 9 und 10 für die erste Hälfte der Proben aus Brennstab H6 aus dem Brennelement NJ05YU in MW/Node.....	60
Tab. 2.44	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 9 und 10 für die zweite Hälfte der Proben aus Brennstab H6 aus dem Brennelement NJ05YU in MW/Node.....	61
Tab. 2.45	Bestrahlungsgeschichte des Reaktorzyklus 10 für die Proben aus den Brennstäben O1, O12, und O13 aus dem Brennelement NJ070G in MW/Node .....	62
Tab. 2.46	Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt für die Proben aus Brennstab D5 des Brennelements NJ05YU .....	65
Tab. 2.47	Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt der Nachbestrahlungsanalyseproben für die erste Hälfte der Proben aus Brennstab H6 des Brennelements NJ05YU .....	66
Tab. 2.48	Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt der Nachbestrahlungsanalyseproben für die zweiten Hälfte der Proben des Brennstabs H6 des Brennelements NJ05YU .....	67
Tab. 2.49	Nuklidzusammensetzung aller gemessenen Nuklide zum jeweiligen Messzeitpunkt für die Proben des Brennelements NJ070G .....	69

Tab. 2.50	Liste der betrachteten Nuklide .....	72
Tab. 2.51	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für das Brennelement NJ07OG .....	73
Tab. 2.52	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für die vom ANL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU .....	74
Tab. 2.53	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % für die vom ORNL gemessenen Proben des Brennelements NJ05YU .....	75
Tab. 2.54	Relevante Reaktordaten des Reaktors Gösgen /PRI 03/ .....	85
Tab. 2.55	Geometrische Abmessungen der Brennelemente 12-40, 1601 und 1701 sowie dessen Brennstäbe nach /PRI 03/.....	86
Tab. 2.56	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 nach /PRI 03/ .....	87
Tab. 2.57	Brennstoffdichteangaben für die Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 nach /PRI 03/.....	87
Tab. 2.58	Bestrahlungszeitraum der Brennelemente 12-40 (Zyklus 12 – 15) sowie 1601 und 1701 (Zyklus 16 – 18) nach /PRI 03/ .....	88
Tab. 2.59	Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 12 bis 15 des Reaktors Gösgen für die Probe GU1 /PRI 03/.....	90
Tab. 2.60	Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 16 bis 18 des Reaktors Gösgen für die Proben GU3/GU3' und GU4 /PRI 03/.....	91
Tab. 2.61	Nuklidweise Zusammenstellung der verwendeten Messmethoden für die Proben GU1, GU3/GU3' und GU4 /PRI 03/.....	95
Tab. 2.62	Gemessene Massenverhältnisse im bestrahlten Brennstoff zum Messzeitpunkt für die Proben GU1 (SCK•CEN) und GU4 (ITU) /PRI 03/ .....	97
Tab. 2.63	Gemessene Massenverhältnisse im bestrahlten Brennstoff zum Messzeitpunkt für die Proben GU3 (ITU) und GU3' (SCK•CEN) /PRI 03/ .....	100
Tab. 2.64	Verwendete nuklidweise Zusammensetzung der Brennstoffe der Brennelemente 12-40, 1601 und 1701 aus dem Reaktor Gösgen nach /PRI 03/.....	106
Tab. 2.65	Im Rechenmodell verwendete nuklidweise Zusammensetzung von Zirkaloy-4 nach /PET 16/ .....	107

Tab. 2.66	Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 12 bis 15 für das Brennelement 12-40 des Reaktors Gösgen nach /PRI 03/.....	112
Tab. 2.67	Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 16 bis 18 für die Brennelemente 1601 und 1701 des Reaktors Gösgen nach /PRI 03/ ....	113
Tab. 2.68	Berücksichtigte individuelle Zerfallszeiten der errechneten Nuklidkonzentrationen der Proben des Reaktors Gösgen nach /PRI 03/ .....	114
Tab. 2.69	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % .....	116
Tab. 2.70	Relevante Reaktordaten des Reaktors Beznau-I /PRI 03/.....	122
Tab. 2.71	Geometrische Abmessungen des Brennelements M308 und dessen Brennstäbe nach /PRI 03/.....	122
Tab. 2.72	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung der Proben BM5/BM5' und BM6, gemessen März 1990, nach /PRI 03/.....	124
Tab. 2.73	Brennstoffdichteangaben für die Proben BM5/BM5' und BM6 nach /PRI 03/ .....	124
Tab. 2.74	Wahrscheinliche Brennstoffzusammensetzung für das Brennelement M308 des Reaktors Beznau-I nach /KIL 08b/.....	125
Tab. 2.75	Bestrahlungszeitraum des Brennelements M308 nach /PRI 03/.....	126
Tab. 2.76	Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 20 bis 25 des Reaktors Beznau-I für die Proben BM5/BM5' /PRI 03/ .....	128
Tab. 2.77	Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 20 bis 25 des Reaktors Beznau-I für die Probe BM6 /PRI 03/ .....	130
Tab. 2.78	Nuklidweise Zusammenstellung der verwendeten Messmethoden für die Proben BM5/BM5' und BM6 /PRI 03/ .....	134
Tab. 2.79	Gemessene Massenverhältnisse im bestrahlten Brennstoff für die Proben BM5 (PSI) und BM5' (SCK•CEN) /PRI 03/.....	136
Tab. 2.80	Gemessene Massenverhältnisse zum jeweiligen Zeitpunkt der Messung für die Probe BM6 /PRI 03/.....	139
Tab. 2.81	Verwendete nuklidweise Zusammensetzung des Brennstoffs für das Brennelement M308 aus dem Reaktor Beznau-I nach /PRI 03/ .....	145
Tab. 2.82	Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 20 bis 25 für das Brennelement M308 des Reaktors Beznau-I nach /PRI 03/ .....	148

Tab. 2.83	Berücksichtigte dividuelle Zerfallszeiten der errechneten Nuklidkonzentrationen der Proben BM5' und BM6 aus dem Brennelement M308 des Reaktors Beznau-I nach /PRI 03/ .....	153
Tab. 2.84	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % .....	155
Tab. 2.85	Relevante Reaktordaten des GKN-II /SCK 05b/.....	160
Tab. 2.86	Geometrische Abmessungen des Brennelements 419 und dessen Brennstäbe nach /SCK 04/, /SCK 05b/, /SCK 05a/ .....	162
Tab. 2.87	Nuklidweise Brennstoffzusammensetzung nach /SCK 05a/ .....	164
Tab. 2.88	Brennstoffdichte nach /SCK 05a/ .....	165
Tab. 2.89	Brennstoffzusammensetzung nach /SCK 05b/.....	165
Tab. 2.90	Zusammensetzung des Hüllrohrs nach /SCK 05a/.....	166
Tab. 2.91	Bestrahlungszeitraum des Brennelements 419 nach /SCK 05b/ .....	167
Tab. 2.92	Gemittelte Bestrahlungsdaten der Reaktorzyklen 5 bis 8 des Brennelements 419 aus GKN-II /SCK 05b/ .....	169
Tab. 2.93	Gemessene Nuklid-Massenverhältnisse zum jeweiligen Zeitpunkt der Messung /SCK 06/.....	172
Tab. 2.94	Daten der chemischen Separation verschiedener Elemente /SCK 06/...	173
Tab. 2.95	Verwendete nuklidweise Zusammensetzung des Brennstoffs für das Brennelement 419 aus GKN-II nach /SCK 05a/ und /SCK 05b/ .....	178
Tab. 2.96	Verwendete Bestrahlungsdaten der Zyklen 5 bis 8 für das Brennelement 419 aus GKN-II nach /SCK 05b/ .....	181
Tab. 2.97	Berücksichtigte dividuelle Zerfallszeiten der errechneten Nuklidkonzentrationen des Brennelements 419 aus GKN-II nach /SCK 06/ .....	183
Tab. 2.98	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % .....	184
Tab. 2.99	Geometrische Abmessungen der Brennelemente D047, D101 und BT03.....	188
Tab. 2.100	Geometrische Abmessungen der Brennstäbe und Führungsrohre für die Brennelemente D047, D101 und BT03.....	188
Tab. 2.101	Zusätzliche geometrische Abmessungen für das Brennelement BT03...	188

Tab. 2.102	Relevante Details der Brennstäbe MLA098 , MKP109 und NBD107.....	189
Tab. 2.103	Abbrand und axiale Probenposition der Proben aus Calvert Cliffs-1 .....	189
Tab. 2.104	Brennstoffzusammensetzungen für die drei Brennelemente aus Calvert Cliffs-1 .....	190
Tab. 2.105	Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-4.....	191
Tab. 2.106	Zusammensetzung von Edelstahl (SS304) gemäß /REA 17/ .....	192
Tab. 2.107	Zusammensetzung des abbrennbaren Absorbers $Al_2O_3-B_4C$ .....	192
Tab. 2.108	Leistungsgeschichtedaten für die Proben des Stabs MLA098 .....	193
Tab. 2.109	Leistungsgeschichtedaten für die Proben des Brennelement D047 .....	195
Tab. 2.110	Leistungsgeschichtedaten für die Proben des Brennelement BT03 .....	196
Tab. 2.111	Für die Validierung herangezogener Datensatz von experimentell bestimmten Nuklidaten in g/tSMi.....	198
Tab. 2.112	Für die Validierung herangezogener Datensatz von experimentell bestimmten Nuklidaten in g/tSMi.....	199
Tab. 2.113	Für die Validierung herangezogener Datensatz von experimentell bestimmten Nuklidaten in g/tSMi.....	200
Tab. 2.114	Abweichung zwischen Rechnung (C) und Experiment (E) als Werte C/E-1 in Prozent für den Stab MLA098.....	202
Tab. 2.115	Abweichung zwischen Rechnung (C) und Experiment (E) als Werte C/E-1 in Prozent für den Stab MKP109.....	203
Tab. 2.116	Abweichung zwischen Rechnung (C) und Experiment (E) als Werte C/E-1 in Prozent für den Stab NBD107.....	204
Tab. 3.1	Geometrische Abmessungen des Brennelements 2F2DN23 /MIC 17/, /MER 10/ .....	210
Tab. 3.2	Geometrische Abmessungen der Brennstäbe, Führungs- und Instrumentalrohre /MIC 17/, /MER 10/.....	211
Tab. 3.3	Relevante Details der acht Proben aus Brennstab SF98 .....	211
Tab. 3.4	Relevante Details der zehn Proben aus Brennstab SF99 .....	212
Tab. 3.5	Daten zur Materialzusammensetzung des $UO_2$ Brennstoffs.....	212
Tab. 3.6	Daten zur Materialzusammensetzung des $Gd_2O_3$ Brennstoffs /MIC 17/.....	213

Tab. 3.7	Nuklidweise Zusammensetzung des Strukturstoffs Zirkaloy-2.....	214
Tab. 3.8	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 bis 7 für die Proben aus dem Brennstab SF98.....	215
Tab. 3.9	Bestrahlungsgeschichte der Reaktorzyklen 5 bis 7 für die Proben aus dem Brennstab SF99.....	216
Tab. 3.10	Nuklidzusammensetzung der Nachbestrahlungsanalyseproben des Brennelements SF98 (zum Zeitpunkt der Reaktorabschaltung, außer Sm Isotope nach der jeweiligen Abklingzeit).....	218
Tab. 3.11	Nuklidzusammensetzung der Proben des Brennelements SF99 (zum Zeitpunkt der Reaktorabschaltung, außer Sm Isotope nach der jeweiligen Abklingzeit) .....	220
Tab. 3.12	Liste der betrachteten Nuklide .....	223
Tab. 3.13	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % .....	225
Tab. 3.14	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten als C/E-1 in % .....	226
Tab. 4.1	Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle DWR-Proben.....	232
Tab. 4.2	Vergleich C/E-1 für MOTIVE und KENOREST.....	234
Tab. 4.3	Tabelle der mit SCALE6.1 und ENDF/B-VII erzielten Nachrechnungsergebnisse. Aus /ILA 12/ .....	237
Tab. 4.4	Mittelwert und Standardabweichung für C/E-1 für alle SWR-Proben.....	243

**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](http://www.grs.de)