

**Auswirkung einer erhöhten Ausnutzung
von Nuklearbrennstoff
bei den WWER-440/213 Reaktoren
im KKW Mochovce**

DI Dalibor Stráský

Borovany, Februar 2008

im Auftrag von

**GLOBAL 2000
(Friends of the Earth Austria)**



- Inhaltsverzeichnis -

➤ Vorwort

1. Der Nuklearbrennstoff in den Kernkraftwerken in der Slowakei

2. Möglichkeiten der Leistungserhöhung bei Kernkraftwerken

3. Erhöhte Nutzung von Nuklearbrennstoff

3.1. Auswirkungen eines veränderten Abbrands des Brennstoffs

3.2. Auswirkungen von Veränderungen bei der Anfangsanreicherung des Brennstoffs

3.3. Auswirkungen von Veränderungen beim Brennstoffumladzyklus

4. Schlussfolgerungen

➤ Literaturverzeichnis

➤ **Vorwort**

Das Kernkraftwerk Mochovce in der slowakischen Republik steht vor zwei einschneidenden Veränderungen beim Betrieb der Reaktorblöcke im KKW Mochovce, wobei es bei beiden zu einer erhöhten Nutzung der Brennstäbe kommt – bei 1 und 2 zu einer Leistungserhöhung von 100 auf 107% der Nominalleistung, bei den geplanten Blöcken 3 und 4 kommt es höchst wahrscheinlich zu einer Verlängerung der Brennstoffkampagne, d.h. der Verweildauer der Brennstäbe im Reaktor.

Diese Studie behandelt die Fragen, die vor allem mit dem erhöhten Abbrand des verwendeten Nuklearbrennstoffs zusammenhängen, mit der Erhöhung der Anfangsanreicherung und verlängerten Verweildauer im Reaktorkern. Die Auswirkungen dieser veränderten Parameter auf die Eigenschaften und Zusammensetzung des Brennstoffs selbst werden ebenfalls dargestellt.

Während der Brennstoffzyklus bei den Reaktoren, für die die Baugenehmigung vorliegt, nämlich aus dem Jahr 1986, bei 3 Jahren lag¹, werden diese Reaktoren heute mit 4,5 (Blöcke 1 und 2 von Mochovce) betrieben. Dass es sich dabei um eine signifikante Veränderung handelt, die nicht einfach unter den Tisch gekehrt werden kann, sondern Veränderungen bei der Radionuklidzusammensetzung, bei eventuellen Austritten während des Normalbetriebs wie auch bei Strahlenunfällen bedeutet, zeigt diese Studie.

Es ist legitim anzunehmen, dass die Leistungserhöhung bei den Blöcken 1 und 2 ebenso für die fertigzustellenden Blöcke 3 und 4 geplant ist. Daher es nicht nachvollziehbar, dass für die Fertigstellung der Blöcke 3 und 4 keine grenzüberschreitende Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchgeführt wird, die für die Blöcke 1 und 2 sehr wohl gemacht wird. Sollte – wie vom Sprecher von SE mitgeteilt – KEINE Leistungserhöhung bei 3 und 4 bereits eingeplant sein, stellt sich die Frage, welcher Brennstoffzyklus hier zur Anwendung kommen wird: Wie die zur UVP von 1 und 2 nachgereichten Unterlagen zeigen² wird in Folge der Leistungserhöhung von 100% auf 107% die Dauer, die die Brennstäbe im Reaktor verwendet werden, wieder reduziert, nämlich von 4,5 auf 4 Jahre.

Ganz klar ist in jedem Fall: Die Dauer des Brennstoffzyklus bei Mochovce 3 und 4 wird von 3 Jahren auf mindestens 4, bzw. 5 oder 6 Jahren erhöht werden. Die daraus resultierenden Implikationen davon zeigt diese Studie auf, u.a. dass die Sicherheitsreserven bis an die Grenzen ausgenutzt werden, um auf Kosten der Sicherheit zu mehr Leistung und somit mehr Profit zu kommen.

Die rechtliche Schlussfolgerung kann nur lauten, dass eine Umweltverträglichkeitsprüfung für ein in Schlüsselbereichen signifikant verändertes Projekt unumgänglich ist, da es sich in Summe um ein neues Projekt handelt.

Patricia Lorenz, GLOBAL 2000

1 Bezpečnosť jaderné energie, 14(52), 2006, č. 7/8, 2. Historie palivového cyklu.

2 http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/umweltpolitische/ESPO/Overfahren/UVP_Mochovce12/108_Konsultationen_Antwort_oe_Fragen_sk_EMO12.pdf

I. Der Nuklearbrennstoff in den Kernkraftwerken in der Slowakei

Alle in der Slowakei betriebenen Kernkraftwerke sind mit Reaktoren vom Typ WWER 440 ausgestattet und verwenden identische Brennstoffkassetten mit sechseckigem Grundriss mit 126 Brennstäben, die wiederum aus Urandioxid- Pellets in Brennstoffhüllen aus Zirkoniumlegierung mit Niob enthalten. Die Anreicherung des frischen Brennstoffs beträgt 3,6%, 2,4% und 1,6 % Uran-235. Der Brennstoff bleibt für maximal 4 Brennstoffkampagnen mit einer Dauer von 280 effektiven Tagen pro Kampagne im Reaktor. Dabei wird ein durchschnittlicher Abbrand von 38 MWd/kgU erreicht, maximal von 40,5 MWd/kgU für die Kassetten mit einer Anreicherung von 3,6% (bei einer Verweildauer über 3 Kampagnen im Reaktor wird ein durchschnittlicher Abbrand von 32 MWd/kgU erreicht, maximal von 38 MWd/kgU).

<KMOŠENA>

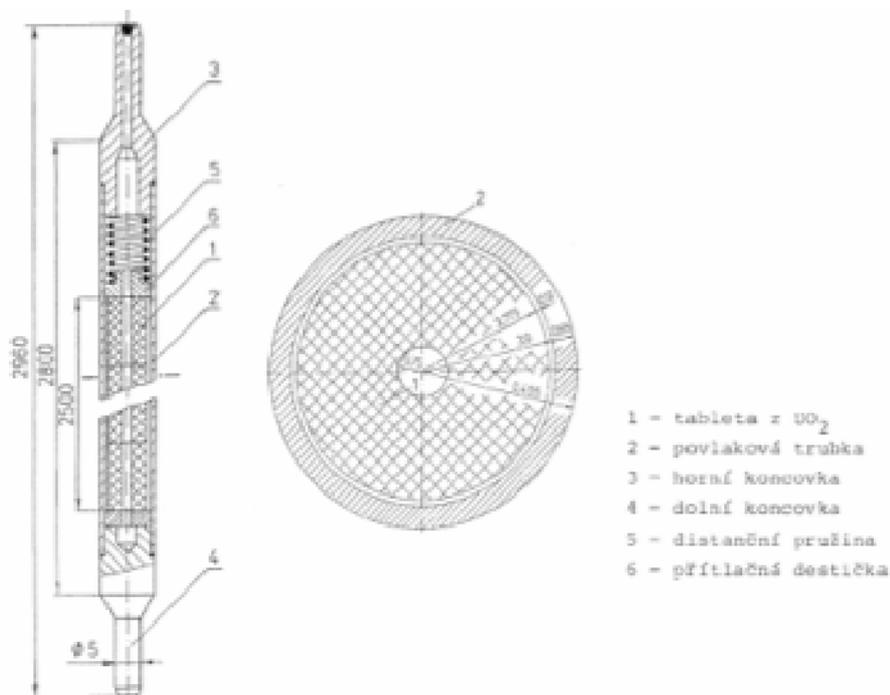


Abb. 1: Brennstab für WWER-440 Reaktoren (1. Urandioxid-Tablette, 2. Hüllrohr, 3. oberes Endstück, 4. unteres Endstück, 5. Abstandhalter, 6. Stützhülse)

Der frische Brennstoff für die slowakischen KKW wird aus der Russischen Föderation bezogen, vom Unternehmen TVEL. Entsprechend dem Liefervertrag aus dem Jahre 1998 (der bis 2004¹ lief) handelt es sich um Brennstoff mit Großteils 3,82% Anreicherung, bei dem die Anreicherung innerhalb einer Kassette unterschiedlich verläuft und einen maximalen Abbrand von 45 MWd/kgU (42 MWd/kgU beim Brennstoffteil der Regelkassette) garantiert. Mit diesem Brennstoff wurde der Reaktor

1 Im Jahre 2005 wurde ein neuer Vertrag abgeschlossen, der u. a. den Brennstoffpreis bis Vertragsende 2010 garantiert.

Mochovce im Jahre 1999 zum ersten Mal beladen. Der Brennstoff ohne unterschiedliche Anreicherung wird in WWER 440/230 Reaktoren verwendet (von denen heute nur mehr ein einziger in Jaslovské Bohunice in Betrieb befindlich ist). <KMOŠENA>

Der Kern aller WWER 440-Reaktoren ist für 349 Brennstoffkassetten ausgelegt. In den WWER 440/230 Reaktoren wurden nur 313 Kassetten eingesetzt, weil die übrigen äußeren Kassetten durch 36 Abschirmkassetten ersetzt wurden, um den Neutronenfluss auf den Reaktordruckbehälter zu reduzieren. Während einer der beiden WWER 440/230 in Bohunice bereits 2006 aus dem Betrieb genommen wurde, soll der zweite dieses Jahr abgeschaltet werden. <KMOŠENA>

Für beide Blöcke des KKW Mochovce wurde in der ersten Brennstoffkampagne die ursprünglich projektierte Brennstoffbeladung verwendet, um die Garantien für die Kraftwerksanlage als ganzes zu erhalten. Der erste Block wurde mit einheitlich angereicherten Kassetten mit einer Anreicherung von 1,6% und 2,4% Uran-235 mit Stahlabstandhaltern und einer Wanddicke des Kassettenmantels von 2,1 mm beladen, weiters mit Kassetten mit einheitlicher Anreicherung und Stahlabstandhaltern und einer Wanddicke des Kassettenmantels von 1,5 mm und einer Anreicherung von 3,6% Uran-235. Im 2. Block waren alle Kassetten einheitlich angereichert und mit Zirkonabstandhaltern versehen, wobei alle Arbeitskassetten eine Wanddicke von 1,5 mm hatten. Dieser Unterschied hatte eine wesentliche Auswirkung auf die Verwendung des Brennstoffs am Anfang der Kampagne.

Am 1. Block war der Betrieb während der ersten 85 effektiven Tage auf unter 100% der Nominalleistung beschränkt und lag in Folge der linearen Leistung der Brennstäbe über 325 W/cm. Die Verwendung von dünnwandigen Kassetten und Zirkonabstandhaltern im 2. Block führte zu einer Umverteilung der Leistung auf die Kassetten mit einer Anreicherung von 1,6% bis 2,4% Uran-235, sodass nach 40 effektiven Tagen die Nominalleistung erreicht wurde. <ŠIMKO>

Ab der zweiten Brennstoffkampagne wurden im 1. Block mit Anreicherungsprofil versehene Kassetten mit einer mittleren Anreicherung von 3,82 % Uran-235 verwendet. Der russische Brennstoffhersteller arbeitete die dazugehörigen Zusätze zum Sicherheitsbericht (1999) und ein Projekt zur Einführung eines neuen Brennstoffzyklus aus. Es fand der Übergang auf die fünfjährige Nutzung von Brennstoffkassetten und die Zusammenstellung von Beladungen mit einer verringerten Neutronenfreisetzung statt.

Ab der dritten Brennstoffkampagne wird ein mittlerer Abbrand von 42,5 MWd/kgU erzielt, maximal von 45,3 MWd/kgU und der Durchschnittswert für die Verweildauer der Brennstoffkassetten im Reaktorkern erreicht 4,72 Jahre (48 Kassetten für 5 Jahren, 18 Kassetten für 4 Jahre). In die Peripheriezellen des Kerns werden mit einer Symmetrie von 60° 8

Kassetten für das fünfte Jahr und 3 für das vierte Jahr eingesetzt. Grundanforderung für diesen Plan der Brennstoffbeladungen war die maximale Wirtschaftlichkeit beim Brennstoffzyklus, was sich andererseits darin niederschlägt, dass sich der Betrieb des Reaktorkerns während der gesamten Brennstoffkampagne an der Grenze der von der Aufsichtsbehörde UJD SR bewilligten Werte bewegt. <ŠIMKO>

Die Entscheidung für die Beladung mittels IN-OUT¹ System hatte einen verstärkenden Effekt auf die Fluenz der schnellen Neutronen, die zur Versprödung des Reaktordruckbehälters führen. Bei den Reaktoren des KKW Mochovce wird nicht mit dem Einsatz von Abschirmkassetten gerechnet, da die errechnete Minimaltemperatur des Sprödbruchs günstige Werte erzielt, auch in Folge der Verwendung von Stahl mit einem verringerten Beimischungsanteil. <ŠIMKO>

Im Jahre 2006 wurde im KKW Mochovce der Übergang auf Brennstoff mit Gadolinium als abbrennbaren Absorber begonnen. <SEAS>

Im Rahmen der Verbesserung der Wirtschaftlichkeitsparameter des 3. und 4. Blocks des KKW Mochovce wird mit einem Brennstoffeinsatz mit einer Anreicherung von 4,25% mit Gadoliniumabsorbieren gerechnet, mit einer fünfjährigen Kampagne und einem Abbrand von 50 MWd/kgU. Für die Zukunft wird dann mit dem Einsatz von Brennstoff mit einer 4,86% Anreicherung, sechsjähriger Kampagne und Abbrand von 60 MWd/kgU gerechnet. <VUJE>

II. Möglichkeiten der Leistungserhöhung bei Kernkraftwerken

Eine Erhöhung der wirtschaftlichen Effektivität von Kernreaktoren in Betrieb kann mit folgenden Möglichkeiten erzielt werden <HEZOUČKÝ>

- Erhöhung der jährlichen Nutzung (Erhöhung der Zuverlässigkeit, effektive und im Detail geplante Verkürzung der Abschaltdauer, Verlängerung der Zeitabstände für die Umladung des Brennstoffs – der Brennstoffkampagne - auf 18 und mehr Monate),
- Bereitstellung von besser bezahlten Dienstleistungen, als es die einfache Stromlieferung in Grundlast darstellt,
- längerer als ursprünglich geplanter Betrieb von Reaktorblöcken (Lebensdauererweiterung), und
- Leistungserhöhung bei den Blöcken mit dem Ziel eines höheren Wirkungsgrads bei der Umwandlung von thermischer Energie und/oder Erhöhung der thermischen Leistung des Reaktors.

Diese angeführten Möglichkeiten haben nicht nur positive Effekte: Eine Erhöhung der Leistung verbessert die jährliche Auslastung, kann allerdings zu einer unbeabsichtigten Lebensdauererweiterung führen.

1 Beim Brennstoffbeladungssystem OUT-IN wird der frische Brennstoff an den Rand des Kerns gesetzt und mit fortschreitendem Abbrand bei den Umladungen in die Mitte des Kerns gesetzt. Im Gegensatz dazu wird beim IN-OUT System der frische Brennstoff eher in die Mitte des Reaktorkerns gesetzt und bei den Umladungen an den Rand gesetzt.

Das Anbieten von Dienstleistungen (Regulierung von Frequenz und Leistung) führt zu einer Verringerung der jährlichen Nutzung und kann zur Verringerung der Lebensdauer u.ä. führen.

Die Möglichkeiten der Leistungserhöhung der Blöcke können in drei Kategorien unterteilt werden <HEZOUČKÝ>:

1. Umbewertung bei den Messungenauigkeiten – führt für gewöhnlich zu einer Leistungserhöhung von unter 2% und wird durch die Verwendung modernerer Technik für die Leistungsberechnung des Reaktors erreicht, d.h. vor allem durch die genauere Messung des Speisewasserdurchflusses, wodurch die Ungenauigkeit bei der Berechnung der thermischen Reaktorleistung verringert wird.
2. Nutzung der Projektreserven – dabei handelt es sich um eine Leistungserhöhung im Rahmen der Projekt - und Konstruktionsreserven und führt gewöhnlich zu einer Erhöhung der Leistung der Blöcke um bis zu 7%. Durch die tatsächliche Erhöhung der Blockleistung können Werte an den Grenzen der Projektreserven erreicht werden, was vom konkreten Projekt eines Blocks abhängig ist. Diese Art der Leistungserhöhung erfordert einen Umbau der Reaktorschutzsysteme, was allerdings nicht von größeren Anpassungen der Blockanlagen begleitet wird.
3. Große Leistungserhöhung – sie ist höher als die Leistungserhöhung durch die Nutzung der Projektreserven und es wurden bereits Leistungserhöhungen dieser Art um über 20% genehmigt. Eine solche Erhöhung erfordert eine grundlegende Erneuerung, wie etwa Anpassungen bei den Anlagen des Sekundärkreises (Durchflussteil der Turbine), der Kondensationspumpen und deren Motoren, Generatoren und Transformatoren.

Eine notwendige Bedingung für die Festlegung der Höhe der Leistungserhöhung eines Reaktorblocks ist u.a. eine gute ökonomische Analyse. Bei den Druckwasserreaktoren führt nämlich eine Erhöhung der thermischen Leistung des Kerns üblicherweise zur Erhöhung der Messbrennstoffkosten für die Stromerzeugung. Bei denselben Sicherheitslimits pro Brennelementleistung führt die Forderung nach einer höheren Leistung des Kerns dazu, dass der weniger abgebrannte Brennstoff mit einer höheren Leistung an den Rand des Kerns kommt, wo sonst der am stärksten abgebrannte Brennstoff eingesetzt wird. Damit erhöht sich allerdings die Neutronenfreisetzung aus dem Reaktor und es muss mehr frischer Brennstoff beladen oder dessen Anreicherung erhöht werden. Dadurch erhöht sich auch die Belastung des Reaktordruckbehälters mit negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer. Diese Gründe können die Gesamterhöhung der Leistung einschränken und ab einem bestimmten Grad auch den wirtschaftlichen Nutzen verringern. <HEZOUČKÝ>

III. Erhöhte Nutzung von Nuklearbrennstoff

Unter erhöhter Nutzung von Nuklearbrennstoff versteht man vor allem die Erhöhung des mittleren erzielten Abbrands, d.h. durch die Erhöhung der Menge an freigesetzter Energie pro Brennstoffeinheit während der Gesamtverweildauer im Reaktor. Wenn gleichzeitig die Leistung des Kerns gleich bleibt, so bedeutet ein höherer Wert für den mittleren Abbrand eine im Durchschnitt längere Verweildauer des Brennstoffs im Reaktor. <ZÍB>

In der Praxis lassen sich Fälle finden, bei denen das energetische Brennstoffpotential nicht voll genutzt wurde, weil sehr konservative Grenzen für die Brennstoffbelastung zur Anwendung kamen. Eine Abbranderhöhung wird erst dann in Erwägung gezogen, wenn nachgewiesen werden kann, dass eine solche Erhöhung nicht die Sicherheit gefährdet. Eine Erhöhung des Abbrands war meist auch ohne Erhöhung der Anfangsanreicherung des Brennstoffs möglich. Für eine weitere Abbranderhöhung zeigt sich dann, dass auch die Erhöhung der Anfangsanreicherung des Brennstoffs notwendig ist. Parallel dazu wird die Konstruktion der Brennelemente verbessert. <ZÍB>

Die Veränderungen bei Anfangsanreicherung, Verweildauer des Brennstoffs im Reaktor und erzielten mittleren Abbrand wirken sich auf folgende Merkmale des abgebrannten Brennstoffs aus:

- Isotopenzusammensetzung,
- Radioaktivität und
- Restwärmeleistung.

Die WWER-Reaktoren wurden ursprünglich mit einem mittleren Abbrandwert von 28,6 MWd/kgU ausgelegt. <SBORNÍK> Der Brennstoff hatte eine Höchstanreicherung von 3,6% Uran-235 und es wurde eine dreijährige Brennstoffkampagne verwendet. Zum weiteren Vergleich kann man den ursprünglichen Brennstoff mit einem Abbrand von 30 MWd/kgU und mit der genannten Anreicherung heranziehen.

Die Entwicklung der Radioaktivität und der thermischen Leistung der Brennelemente mit den genannten Parametern zeigt die Kurve in Abb. 2 <ZÍB>:

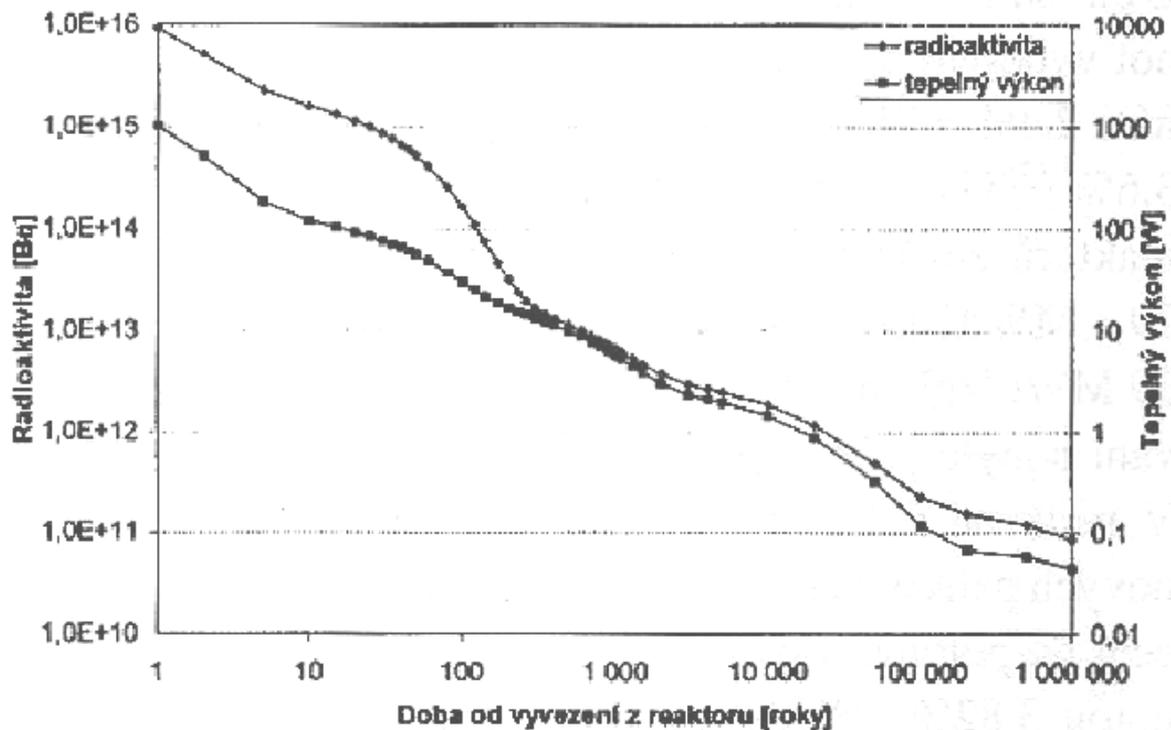


Abb. 2: Entwicklung von Radioaktivität und thermischer Leistung der Brennelemente von WWR 440 mit einer Anfangsanreicherung von 3,6%, Abbrand 30 MWd/kgU und dreijähriger Verweildauer im Reaktor (von links nach rechts: Radioaktivität in Bq, Zeitdauer ab Reaktorentladung (Jahre) und thermische Leistung)

Die Radioaktivität eines Brennelements erreicht im Moment der Reaktorabschaltung den Wert von $8,2 \cdot 10^{17}$ Bq. Bis zur Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor (in etwa 9 Tage nach Abschaltung) sinkt sie auf $8,2 \cdot 10^{16}$ Bq. Gegen Ende des ersten Jahres ab Entladung beträgt der Wert $9,2 \cdot 10^{15}$ Bq usw. (s. Abb. 2).

Die thermische Leistung des Brennstoffs mit den genannten Parametern erreicht im Moment der Reaktorabschaltung 223,5 kW. Innerhalb von 9 Tagen sinkt sie um mehr als eine Größenordnung auf 9,2 kW. Gegen Ende des ersten Jahres ab Entladung aus dem Reaktor kommt es zu einer weiteren Reduktion auf die Größenordnung von 1kW usw. (s. Abb. 2).

Die für die Radioaktivität bedeutendste Gruppe ist zum Zeitpunkt der Brennstoffentladung aus dem Reaktor jene Gruppe von Spaltprodukten, deren Anteil 90% überschreitet. Mit der Zeit verringert sich dieser Anteil, erreicht einen Anteil von unter 50% nach etwa 180 Jahren, liegt nach etwa 300 Jahren unter 10% und nach 500 Jahren bei etwa 1%. Auf diesem Niveau bleibt sie bis etwa 10 000 Jahre nach Entladung, dann beginnt ein Anstieg bis zu einem lokalen Maximum von 30% in etwa 200 000 Jahre ab Entladung, wonach dann ein Absinken auf einen Anteil von 15% folgt. <ZÍB>

Die wichtigsten Beiträge zur Gruppe der Spaltprodukte sind vier Zerfallsketten. <OTČENÁŠEK>

- $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$
- $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$
- $^{137}\text{Cs} - ^{137}\text{Ba}$
- $^{144}\text{Cs} - ^{144}\text{Pr}$

Die Gruppe der Aktivierungsprodukte ist vernachlässigbar, denn ihr Anteil bleibt für den gesamten betrachteten Zeitraum unter 3%.

Der Anteil der Aktinide und ihrer Tochterprodukte entwickelt sich umgekehrt zur Entwicklung der Spaltprodukte. Von den Anfangswerten von unter 10% erhöht er sich schrittweise auf über 90% und sinkt nach 100 000 ab Entladung aus dem Reaktor auf vorübergehend 70%. <ZÍB>

Die Entwicklung bei der Konzentration einiger Radionuklide in Abhängigkeit von Zeit und Abbrand wird in Abb. 3 dargestellt <KESSLER>.

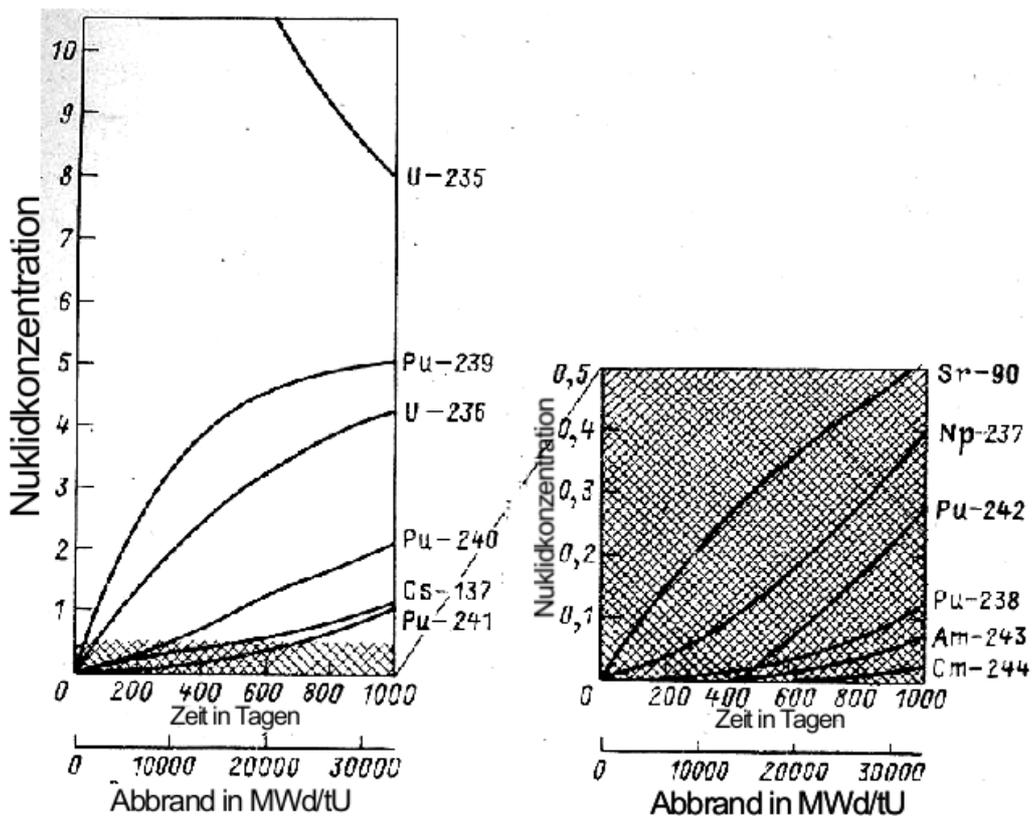


Abb. 3: Entwicklung der Konzentration der Aktinide und Spaltprodukte im Kernbrennstoff nach dreijähriger Verweildauer im Reaktor

In Bezug auf die thermische Leistung fällt der Anteil der Spaltprodukte von 95% am Anfang unter 50% innerhalb von 90 Jahren ab der Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor und unter 10% innerhalb von 200 Jahren ab Entladung. Nach 300 Jahren stabilisiert er sich bei etwa 1%, wo er dann für den Rest des betrachteten Zeitraums bleibt. <ZÍB>

Die Gruppe der Aktivierungsprodukte übersteigt während der gesamten Dauer 1% nicht und ist daher zu vernachlässigen.

In Folge des Rückgangs des Anteils der Spaltprodukte steigt monoton der Anteil an Aktiniden und ihren Tochterprodukten aus den anfänglichen wenigen Prozent auf bis zu 99% innerhalb von 300 Jahren ab Entladung aus dem Reaktor.

3.1. Auswirkungen eines veränderten Abbrands des Brennstoffs

Die Auswirkung der Veränderungen beim Abbrand des Brennstoffs auf die Entwicklung der Radioaktivität zeigt Abb. 4 (eine andere Form der Darstellung findet sich in Abb. 5), Abb. 6 zeigt die thermische Leistung. Der Wert der Anfangsanreicherung des Brennstoffs und die Verweildauer im Reaktor ändert sich nicht im Vergleich zum vorhergehenden Fall. Zu Veränderungen beim Abbrand kommt es real auch im Normalbetrieb des Reaktors in Folge von Ungleichheiten in der Neutronenflussdichte im Kern, allerdings in einem wesentlich geringeren Umfang (Größenordnung einige MWd/kgU). Die Änderung der Radioaktivität (Abb. 4) und der thermischen Leistung (Abb. 6) werden relativ in Bezug auf die Werte im vorhergehenden Fall (Referenzbrennstoff) dargestellt.

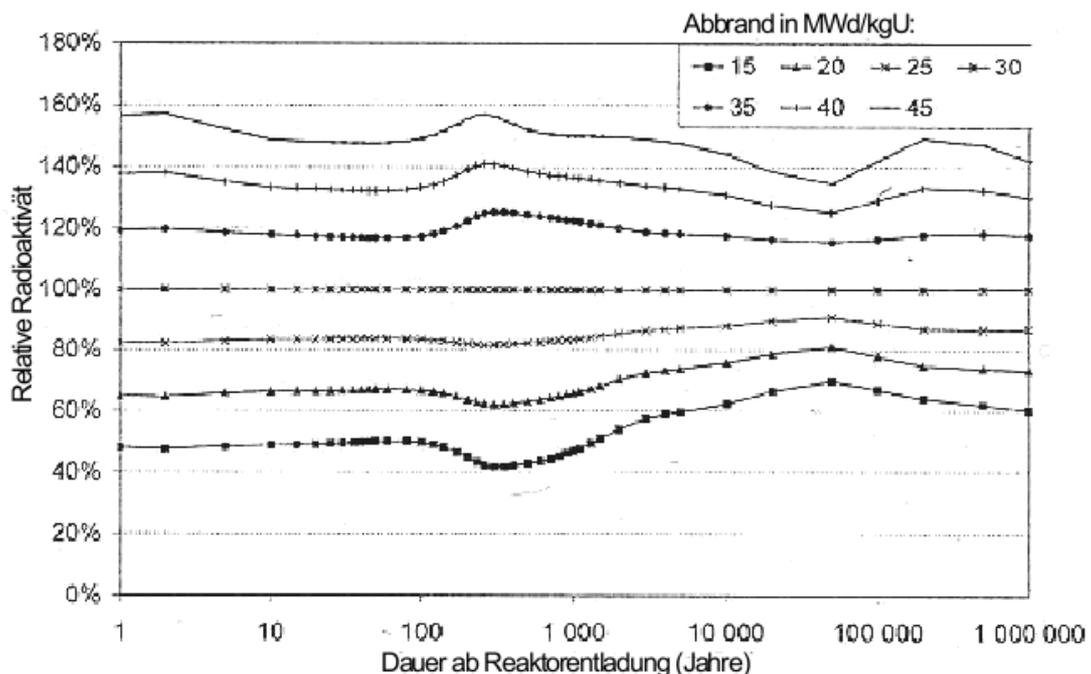


Abb. 4: Entwicklung der Radioaktivität der WWER – 440 Brennelemente mit Anfangsanreicherung von 3,6% und dreijähriger Verweildauer im Reaktor in Abhängigkeit vom Abbrand <ZÍB>

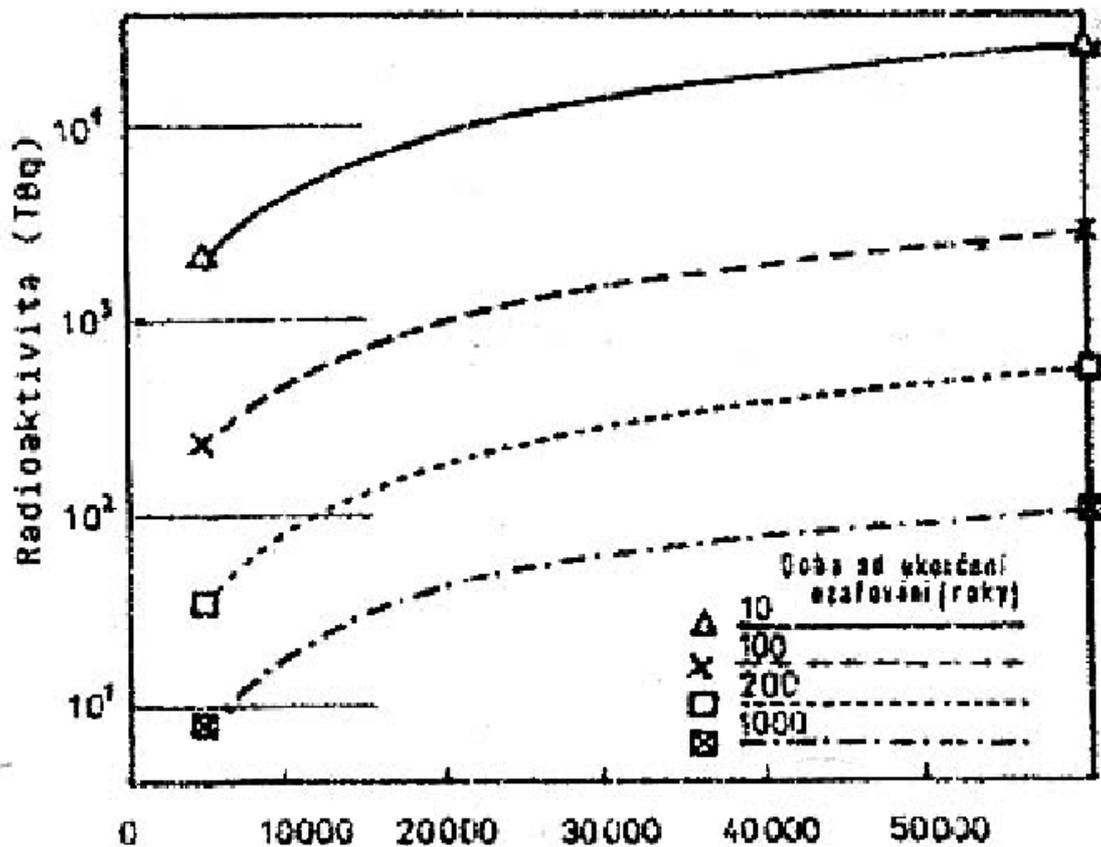


Abb. 5: Radioaktivität des Brennstoffs als Funktion des Abbrands
<OTČENÁCŠEK>

Die Berechnungen weisen eine starke Abhängigkeit der Werte der Radioaktivität und der thermischen Leistung zu jedem Zeitpunkt ab Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor auf die Stärke des Abbrands nach. Mit steigendem Abbrand steigen sowohl Radioaktivität wie auch die thermische Leistung. Als grober Richtwert kann angenommen werden, dass die Änderung eines Prozentpunkts beim Abbrand durchschnittlich zu einem Prozentpunkte Veränderung bei Radioaktivität und thermische Leistung führt. Das bedeutet, dass z. B. für Brennstoff mit einem Abbrand von 45 MWd/kgU einerseits die Radioaktivität, andererseits die thermische Leistung um 50% höher ist als bei Brennstoff mit einem Abbrand von 30 MWd/kgU.

In den ersten Jahren nach der Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor ist die Veränderung bei Radioaktivität und thermischer Leistung höher als proportional und geht mit der Zeit zurück. Bei der thermischen Leistung sind deutlichere Veränderungen im Verlauf der Zeit zu verzeichnen.

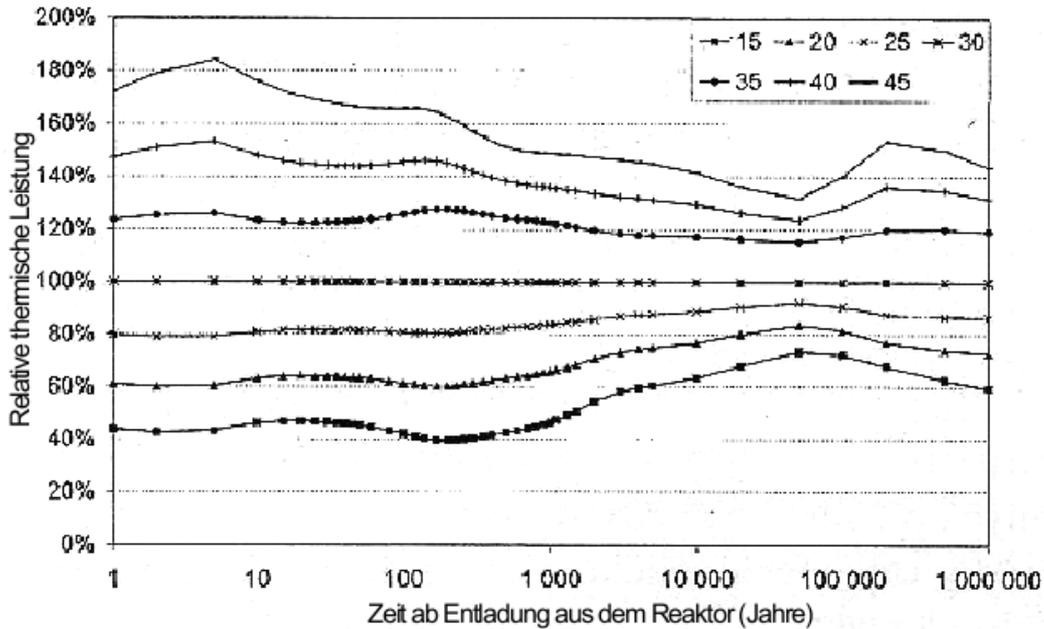


Abb. 6: Entwicklung der thermischen Leistung der WWER-440 Brennelemente mit einer Anfangsanreicherung von 3,6% und dreijähriger Verweildauer im Reaktor in Abhängigkeit von dessen Abbrand <ZIB>

Die Begründung für diese Entwicklung liegt in den folgenden Tatsachen: Brennstoff mit derselben Zusammensetzung wird für dieselbe Verweildauer im Reaktor der Wirkung verschiedener Neutronenflussdichten ausgesetzt. So kommt es pro Zeiteinheit zur Freisetzung einer größeren Menge an Energie aus einer Brennstoffeinheit in Folge einer größeren Anzahl an Spaltvorgängen (Gruppe von Spaltprodukten), gleichzeitig verursacht allerdings eine höherer Neutronenflussdichte eine höhere Aktivierung von Konstruktionsmaterialien (Gruppe von Aktivierungsprodukten). Unter der Annahme der Aufrechterhaltung der Wahrscheinlichkeiten der Neutronenabsorption von U-238 und der daraus entstehenden höheren Aktiniden kommt es gleichzeitig zu einer verstärkten Entwicklung höherer Aktinide, vor allem der Isotope Pu-238, Pu-239, Pu-240 und 241-Am. <ZÍB>

Durch die Auswirkungen des Abbrandes erhöht sich auch der Druck innerhalb des Brennstabs, einige Spaltprodukte haben außerdem korrosive Wirkung. Es kommt zur Veränderung der Struktur des Brennstabs und der Hülle. Ferner kommt es zur Vergrößerung des Volumens der Brennstofftablette (Aufblähen des Brennstoffs). Zusammen mit der unterschiedlichen thermischen Dehnbarkeit von Brennstoff und Brennstoffhülle kann es zu einer mechanischen Interaktion zwischen Brennstoff und Hülle kommen. Diese Interaktion erzeugt mechanische Belastung und Deformation der Hüllen, was zu einer verringerten Lebensdauer führt. <KOPŘIVA>

3.2. Auswirkungen von Veränderungen bei der Anfangsanreicherung des Brennstoffs

Die Auswirkungen der Änderungen in der Anfangsanreicherung des Nuklearbrennstoffs auf Radioaktivität und thermische Leistung bei Einhaltung der Verweildauer des Brennstoffs im Reaktor und der erreichte mittlere Abbrand wird in Abb. 7 bzw. 8 dargestellt. Betrachtet wurden die Werte der Anreicherung in der Bandbreite 3% bis 4,2% U-235 in 0,2%-Stufen. Die Veränderungen sind ebenfalls als relativ dargestellt, bezogen auf die Wert je Referenzbrennstoff.

Die Anfangsanreicherung des Brennstoffs hat einen geringeren Einfluss auf die beobachteten Werte als die Änderungen im Abbrand. Darüber hinaus ist eine höhere Veränderlichkeit in der Zeit offensichtlich. Die Erhöhung der Anfangsanreicherung führt zu einer Verringerung der Werte der Radioaktivität, bzw. der thermischen Leistung.

Die Ursache für diese Entwicklung und die zeitliche Instabilität ist in der unterschiedlichen Entwicklung der Radioaktivität und der thermischen Leistung der einzelnen Gruppen von Produkten zu suchen. Beide beobachteten Größen sind für die Gruppe der Spaltprodukte fast von der Veränderung in der Anfangsanreicherung unabhängig, die Höchstabweichung von den Werten für den Referenzbrennstoff bleibt unter 3% für die Radioaktivität und 6% für die thermische Leistung über den gesamten beobachteten Zeitraum hinweg. Mit dieser Entwicklung ist unter der Annahme zu rechnen, dass sich der erzielte Abbrand des Brennstoffs nicht ändert, da er auf die Spaltproduktgruppe die größte Auswirkung hat. <ZÍB>

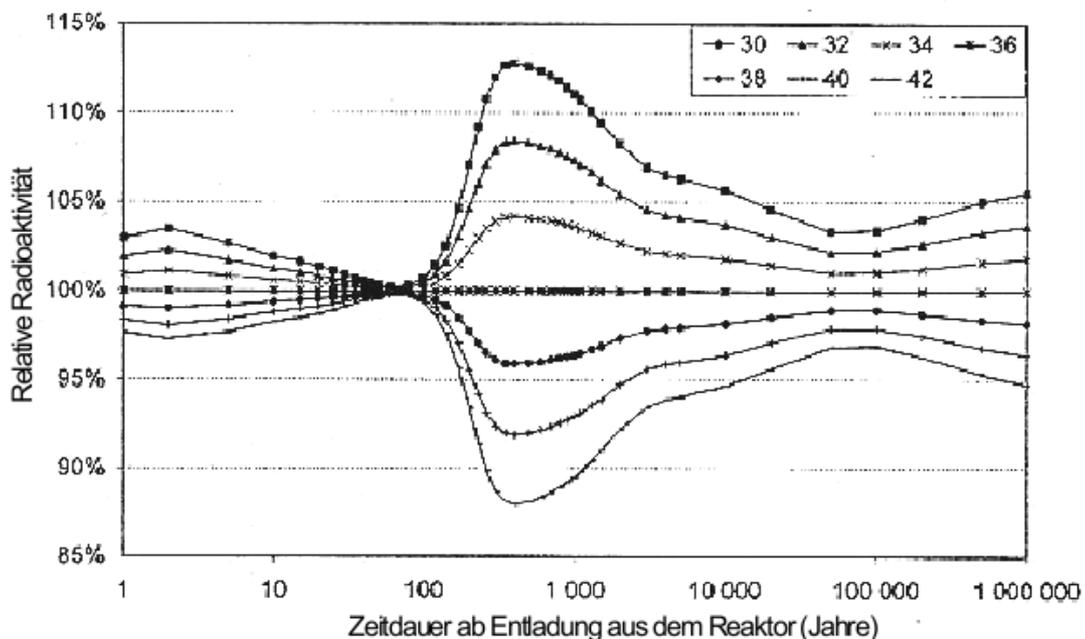


Abb. 7: Entwicklung der Radioaktivität der WWER-Brennelemente mit mittleren erreichten Abbrand 30 MWd/kgU und dreijähriger Verweildauer im Reaktor je nach Anreicherung <ZÍB>

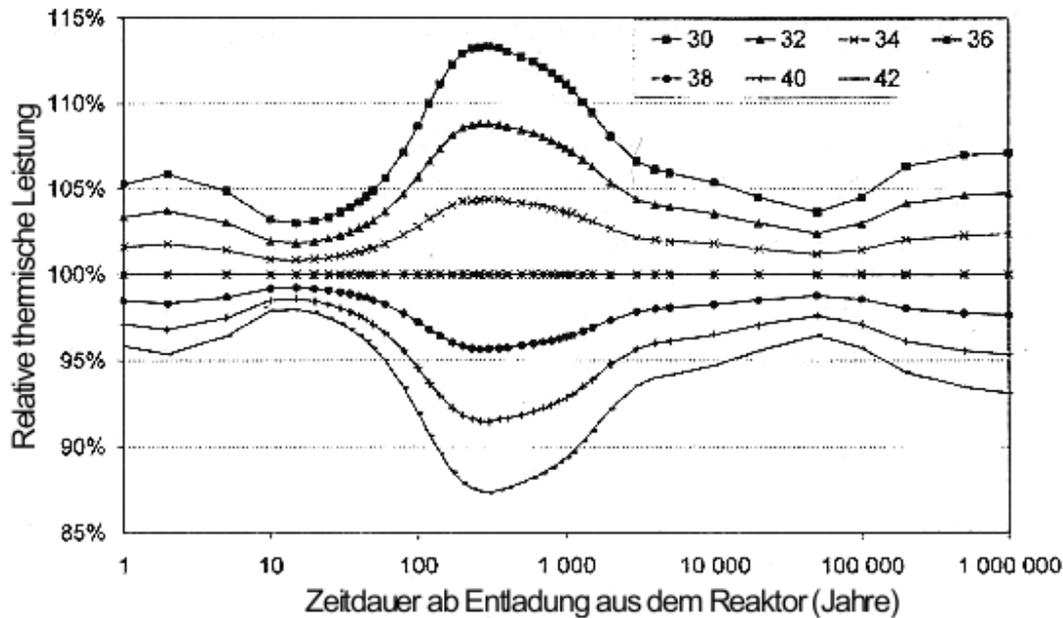


Abb. 8: Entwicklung der thermischen Leistung der WWER 440-Brennelemente mit mittlerem erreichten Abbrand 30 MWd/kgU und dreijähriger Verweildauer im Reaktor in Abhängigkeit von dessen Anreicherung <ZÍB>

Eine ganz andere Situation findet bei der Gruppe der Aktiniden und deren Tochterprodukten. Die Erhöhung der Anfangsanreicherung gegenüber dem Referenzbrennstoff hat einerseits eine Verringerung von dessen Radioaktivität zur Folge, wie auch der thermischen Leistung, da diese Abweichung im Moment der Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor am deutlichsten ist.

Die Verringerung der Anfangsanreicherung mit U-235 gegenüber der Anreicherung des Referenzbrennstoffs und damit auch die Verringerung des Verhältnisses U-235/U-238 wirkt sich positiv auf die Entstehung von höheren Aktiniden durch die höhere Wahrscheinlichkeit der Neutronenabsorption (am wichtigsten sind vor allem Isotope, die zur Radioaktivität und thermischen Leistung am stärksten beitragen – Pu-238, Pu-239, Pu-240 und Am-241). Mehr angefallene höhere Aktinide bedeuten in Folge ihrer Instabilität höhere Radioaktivität und höhere thermische Leistung (gegenüber dem Referenzbrennstoff). Weiters gilt, dass die Halbwertszeit des Zerfalls dieser Aktinide um Größenordnungen geringer ist als die von U-235 und U-238, was die Verringerung der Unterschiede im Lauf der Zeit erklärt. <ZÍB>

Durch die Zusammensetzung der verschiedenen Verläufe der Werte für Radioaktivität und thermische Leistung der Spaltprodukte und Aktinide und ihre Tochterprodukte kommt es zu einer in der Zeit sehr veränderlichen Gesamtkurve. In den ersten Jahren nach Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor überwiegt die Auswirkung der Gruppe der Spaltprodukte. In Folge dessen bewegt sich auch die maximale Abweichung von den Werten des Referenzbrennstoffs in diesem Zeitraum unter 3% im Falle der Radioaktivität, bzw. unter 6% bei der

thermischen Leistung. Da im Verlauf der Zeit die Gruppe der Aktinide und ihrer Tochterprodukte ansteigt, steigt auch die maximale Abweichung. Nach 300 Jahren ist bei beiden Werten die Auswirkung dieser Gruppe dominant und die Kurven kopieren überwiegend die sinkenden Kurven der Abweichungen in den Gruppen der Aktinide und ihrer Tochterprodukte. <ZÍB>

In Folge einer höheren Anfangsanreicherung, die zur Verlängerung des Zyklus notwendig ist, erhöht sich der Reaktivitätsüberschuss zu Beginn der Brennstoffkampagne. Dieser ist dann so hoch, dass Brennstoff mit abbrennbaren Absorbern (Gd-155, Gd-157, B-10) verwendet werden muss, da eine simple Erhöhung der Borsäurekonzentration im Kühlmittel nicht ausreicht. Damit wird auch ein weiteres Problem gelöst, das bei der Brennstoffbeladung des Reaktors entsteht. Denn die Brennstoffbeladung führt zu einer Erhöhung des ohnehin hohen Neutronenflusses in den zentralen Bereichen des Kerns im Vergleich zu den Rändern und damit werden die Leistungspeaks innerhalb des Kerns deutlicher. <KOPŘIVA>

3.3 Auswirkungen von Veränderungen beim Brennstoffumladezyklus

Die Auswirkungen des Brennstoffumladezyklus auf die Werte der Radioaktivität und der thermischen Leistung sind sehr gering und die maximalen Abweichungen von den Werten für den Referenzbrennstoff bleiben unter 3% (s. Kurven der Abb. 9 und 10). Das gilt für die Dauer nach der etwa zehnjährigen Übergangsperiode ab Entladung aus dem Reaktor. Die Entwicklung im anfänglichen Übergangsstadium beruht auf einer Situation in der Gruppe der Spaltprodukte. Die Berechnungen zeigen, dass mit ansteigender Dauer des Zyklus (unter Einhaltung der Abbrandwerte und Anfangsanreicherung) einerseits die Radioaktivität sinkt, andererseits auch die thermische Leistung dieser Gruppe im Vergleich zum Referenzbrennstoff im Moment der Brennstoffentladung aus dem Reaktor. Bei jedem der betrachteten Zyklen (drei bis fünfjährig) kann mit in etwa derselben Menge an entstandenen Spaltprodukten gerechnet werden. Diese zerfallen allerdings gleich im Moment ihres Entstehens und am Ende eines längeren Zyklus ist ihre Menge daher im Vergleich zum kürzeren Zyklus geringer. Eine Auswirkung hat auch die Tatsache, dass ein längerer Zyklus bei der Einhaltung der Abbrandwerte eine niedrigere Leistung pro Brennstoffeinheit pro Zeiteinheit bedeutet. Die Isotope mit einer sehr kurzen Halbwertszeit, für die eine Einstellung eines Gleichgewichtszustands ihrer Menge im Brennstoff während des Betriebs typisch ist, stabilisieren sich in Folge einer niedrigeren Leistung auf niedrigerer Mengen.

Im Verlauf der Zeit werden jene Spaltproduktisotope mit einer längeren Halbwertszeit (Jahrzehnte und mehr) bedeutender, für die eine

Verlängerung der Zerfallsperiode um ein Jahr oder zwei keinen grundlegenden Einfluss auf ihren Anteil an zerfallenden radioaktiven Kernen hat. Dem entspricht auch die Entwicklung der beobachteten Abweichungen von Radioaktivität und thermischer Leistung der ganzen Spaltproduktgruppe in der zeitlichen Entwicklung. Im Moment der Entladung aus dem Reaktor sind sie in der Größenordnung von Zehntelprozent, im Zeithorizont von Jahren verringern sie sich auf ein Niveau von 2%. Die Abweichungen in der Gruppe der Aktinide und ihrer Tochterprodukte sind im überwiegenden Ausmaß im gesamten beobachteten Zeitraum unter 3%. Die Bedeutung der Gruppe der Aktivierungsprodukte ist gering. Wenn wir die Beiträge aller dreier Produktgruppen zusammenlegen, so erhalten wir einen Verlauf mit einer anfänglichen Übergangsperiode, nach dessen Abklingen die Abweichung von den Werten des Referenzbrennstoffs das Niveau von 3% nicht überschritten wird. <ZÍB>

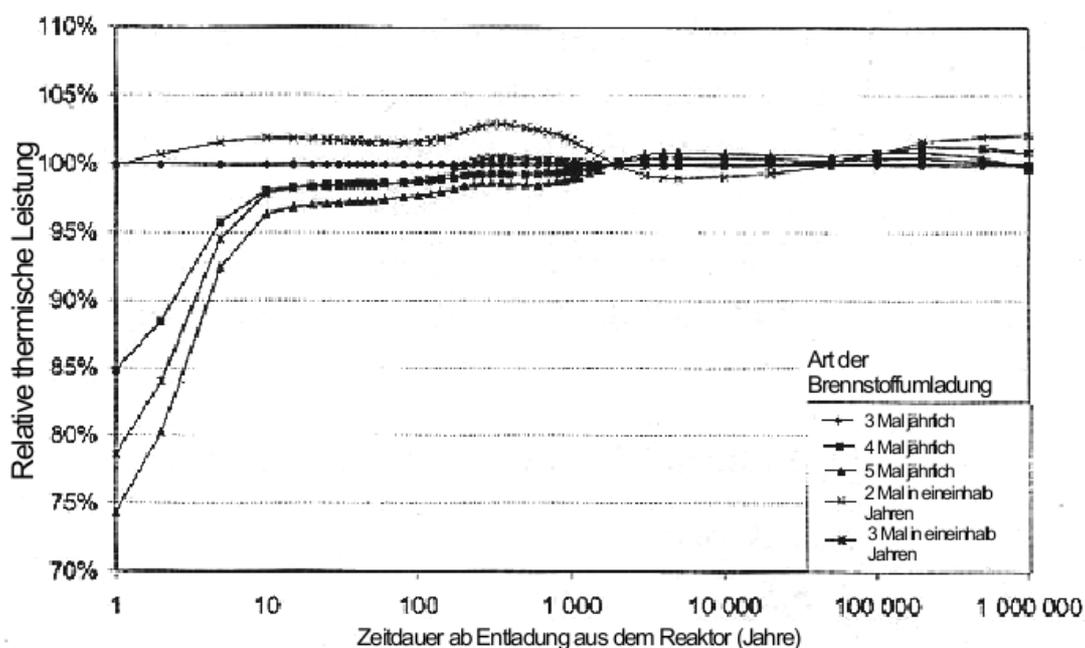


Abb. 9: Entwicklung der Radioaktivität von WWER 440-Brennelementen mit mittlerem erreichten Abbrand von 30 MWd/kgU und Anfangsanreicherung von 3,6% je nach Art des Brennstoffumladezyklus <ZÍB>

Eine verlängerte Brennstoffkampagne und eine verlängerte Verweildauer des Brennstoffs im Reaktor stellen höhere Anforderungen an die Belastbarkeit des Brennstoffs und zwar bei der thermohydraulischen wie auch der mechanischen Belastung in Verbindung mit der Degradierung des Brennstoffs und auch seiner Deformation in Folge von Abbrand und Druckverhältnissen innerhalb und außerhalb des Brennstoffs. <KOPŘIVA>

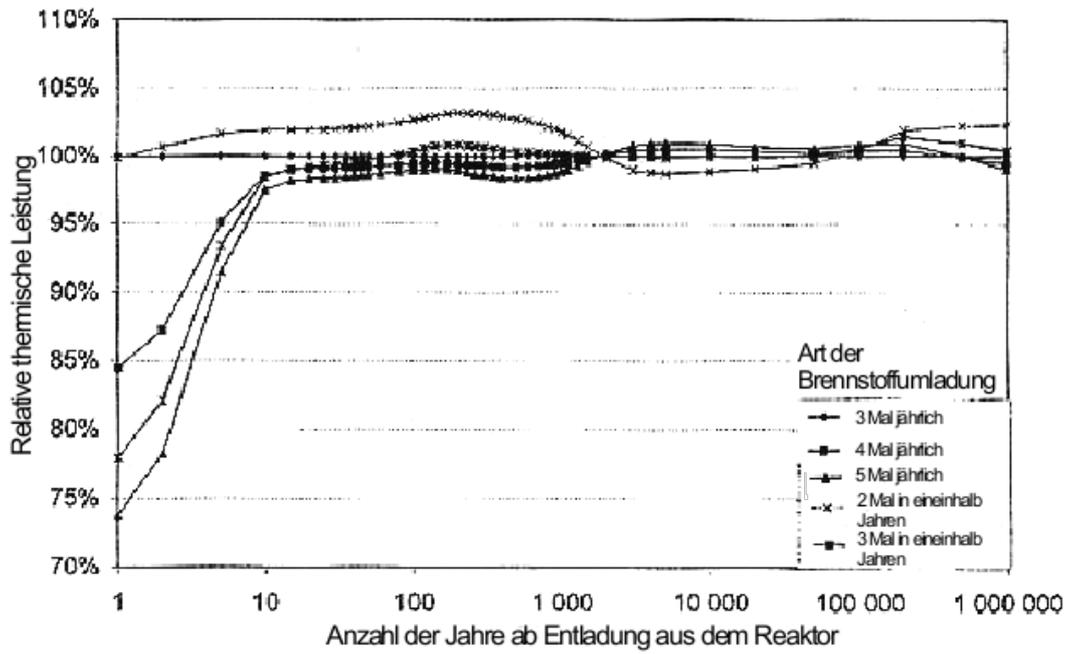


Abb. 10: Entwicklung der thermischen Leistung von WWER 440-Brennelementen mit mittlerem erreichten Abbrand von 30 MWd/kgU und Anfangsanreicherung von 3,6% je nach Art des Brennstoffumladezyklus <ZiB>

Schlussfolgerungen

Eine eher ungewollt pointierte Schlussfolgerung zog der Autor der Bakkalaureatsarbeit <KOPRIVA>: „Die ursprünglichen Brennstoffzyklen basierten vor allem auf dem sicheren Betrieb, mussten allerdings schrittweise durch modernere, finanziell effektivere ersetzt werden.“

Die Erhöhung der ökonomischen Effizienz der betriebenen Kernkraftwerksblöcke kann man durch die Erhöhung der jährlichen Nutzung der Blöcke erreichen, durch die Bereitstellung besser entgoltenener Dienstleistungen als es die Stromlieferung in Grundlast darstellt, oder die Verlängerung der Lebensdauer und Leistungserhöhung der Blöcke.

Die genannten Methoden bringen nicht nur positive Effekte: die Leistungserhöhung verbessert die jährliche Nutzung, kann allerdings zu einer verringerten Lebensdauer führen u.ä.

Die Leistungserhöhung kann durch eine Umbewertung der Meßungenauigkeiten, die Ausnutzung von Projektreserven und grundlegende Rekonstruktionen stattfinden.

Ein gewisses Risiko bei den Leistungserhöhungen des Kernkraftwerksblöcke kann man darin erkennen, dass gezielt Sicherheitsreserven genutzt werden und die Blöcke dann mit einer verringerten Sicherheitsreserve betrieben werden.

Diese Studie befasst sich vor allem mit der erhöhten Brennstoffnutzung. Das ist vor allem über die Erhöhung des mittleren erzielten Abbrands zu erreichen. Wenn gleichzeitig die Leistung des Kerns beibehalten wird, bedeutet diese einen höheren Wert beim mittleren Abbrand bei einer durchschnittlich höheren Verweildauer im Reaktor. Eine Abbranderhöhung war üblicherweise auch ohne die Erhöhung auch der Anfangsanreicherung des Brennstoffs möglich.

Veränderungen bei der Anfangsanreicherung, bei der Verweildauer im Reaktor und dem erzielten mittleren Abbrand wirken sich auf die Hauptmerkmale des abgebrannten Brennstoffs aus, wie etwa die Isotopenzusammensetzung, die Radioaktivität und die thermische Restleistung.

Es zeigte sich, dass die größte Auswirkung auf die Radioaktivität und die thermische Restleistung des abgebrannten Brennstoffs die Erhöhung des Abbrands hat, und das zu jedem Zeitpunkt ab Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor: Mit steigendem Abbrand erhöhen sich auch die Radioaktivität und die thermische Leistung. Als grober Richtwert kann angenommen werden, dass die Änderung eines Prozentpunkts beim Abbrand durchschnittlich zu einem Prozentpunkte Veränderung bei Radioaktivität und thermische Leistung führt. Durch die Auswirkungen

des Abbrandes erhöht sich auch der Druck innerhalb des Brennstabs, einige Spaltprodukte haben außerdem korrosive Wirkung. Es kommt zur Veränderung der Struktur des Brennstabs und der Hülle. Ferner kommt es zur Vergrößerung des Volumens der Brennstofftablette (Aufblähen des Brennstoffs). Zusammen mit der unterschiedlichen thermischen Dehnbarkeit von Brennstoff und Brennstoffhülle kann es zu einer mechanischen Interaktion zwischen Brennstoff und Hülle kommen. Diese Interaktion erzeugt mechanische Belastung und Deformation der Hüllen, was zu einer verringerten Lebensdauer führt.

Diese beiden Faktoren machen eine Änderung bei der Aufsicht über die Behandlung mit dem abgebrannten Brennstoff notwendig (höhere Anforderungen an die Abschirmung und Restwärmeabfuhr in allen Phasen der Brennstoffentsorgung). Zusammen mit einer längerer Verweildauer im Kern bedeutet dies eine höhere mechanische Belastung und daher auch höherer Wahrscheinlichkeit eines Versagens, sei es noch im Reaktor oder bei späterer Behandlung der Brennstäbe.

Der höhere Abbrand bedeutet auch eine erhöhte Konzentration von Nukliden mit einer höheren Halbwertszeit und insgesamt ändert sich die Brennstoffzusammensetzung. Dies macht neue Berechnungen zu den Folgen eventueller Unfälle mit der Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt erforderlich.

Die Anfangsanreicherung des Brennstoffs hat eine geringere Auswirkung auf die beobachteten Werte als die Veränderung im Abbrand. Auch eine größere Veränderlichkeit in der Zeit macht sich bemerkbar. Die Erhöhung der Anfangsanreicherung führt Verringerung der Radioaktivität, bzw. der thermischen Restleistung.

Die Auswirkungen des Beladezyklus auf die Radioaktivität bzw. die thermische Leistung sind sehr gering und die maximale Abweichung gegenüber dem Referenzbrennstoff bleibt unter 3%. Das gilt auch für die Dauer nach der etwa zehnjährigen Übergangsperiode nach Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor.

Eine verlängerte Brennstoffkampagne und eine verlängerte Verweildauer des Brennstoffs im Reaktor stellen höhere Anforderungen an die Belastbarkeit des Brennstoffs und zwar bei der thermohydraulischen wie auch der mechanischen Belastung in Verbindung mit der Degradierung des Brennstoffs und auch seiner Deformation in Folge von Abbrand und Druckverhältnissen innerhalb und außerhalb des Brennstoffs.

Literaturverzeichnis

- <KMOŠENA> Kmošena, J., Vandlíková, M.: Konceptia palivového cyklu v SR, in: Bezpečnost jaderné energie, č. 3/4, SÚJB, ÚJD, Praha, březen – duben 2001
- <ŠIMKO> Šimko, J.: Vnútorný palivový cyklus v JE Mochovce, in: Bezpečnost jaderné energie, č. 3/4, SÚJB, ÚJD, Praha, březen – duben 2001
- <ZÍB> Zíb, A.: Dopad vyššího využití paliva na hlavní charakteristiky vyhořelého jaderného paliva typu VVER 440, in: Bezpečnost jaderné energie, č. 11/12, SÚJB, ÚJD, Praha, listopad - prosinec 2001
- <SBORNÍK> Konstrukční a výpočtové otázky reaktoru VVER 440, sborník referátů, ÚISJP Zbraslav, 1978
- <HEZOUČKÝ> Hezoučký, F., Štech, S.: Zvýšení výkonu jaderného bloku – cesta ke zvýšení jeho ekonomické efektivity, in: Bezpečnost jaderné energie, č. 7/8, SÚJB, ÚJD, Praha, červenec - srpen 2006
- <OTČENÁŠEK> Otčenášek, P.: Základy konstrukce a funkce jaderných elektráren, ČVUT, Praha, 1994
- <KESSLER> Kessler, G.: Nuclear Fission Reactors. Potential Role and Risks of Converters and Breeders, ruský překlad, Energoatomizdat, Moskva, 1986
- <KOPŘIVA> Kopřiva, R.: Střední část palivového cyklu na elektrárně Dukovany, ČVUT FJFI, Praha, 2006
- <VUJE> Cillik, I., Rohár, Š.: Safety Issues to be Solved in Mochovce NPP Units 3&4, Design Revision, VÚJE, Trnava, september 2006
- <SEAS> Anonymus: Výročná správa za rok 2006, Slovenské elektrárne, 2007

Weitere Informationen

Anti-Atom-Sprecherin:

DI Silva Herrmann, 0699/142000 17

Presse:

Mag. Ruth Schöffl 0699/14 2000 19

Mag. Lydia Matzka-Saboi 0699/14 2000 26

presse@global2000.at

GLOBAL 2000 ist die unabhängige österreichische Umweltschutzorganisation. Als aktiver Teil von Friends of the Earth International (FOEI) kämpft GLOBAL 2000 für eine intakte Umwelt, eine zukunftsfähige Gesellschaft und nachhaltiges Wirtschaften.

GLOBAL 2000: Umwelt braucht Schutz!