

Die NIS-Crew des 3-D-Aktivierungsverfahrens



„Monte Carlo“ liefert Innovations-Push: Neues 3-D-Aktivierungs- verfahren für den Rückbau

von Dirk Bender



Der Rückbau eines Kernkraftwerks stellt jeden Betreiber vor große Herausforderungen. Alleine der Abriss des gesamten Areals eines typischen Kernkraftwerks bis zur „grünen Wiese“ verschlingt ca. eine Milliarde Euro. Im KKW Biblis führte diese Aufgabe zu einer innovativen Idee für mehr Planungssicherheit zusammen mit der NIS Ingenieurgesellschaft – und einem Verfahren, das nur dem Namen nach mit einem Casinospiegel zu tun hat ...

Der abrupte Stopp des Leistungsbetriebs von Biblis erforderte ein Umdenken im Kraftwerk – vorher noch Stromlieferant, galt es nun, den Abriss zu planen. Seit Inbetriebsetzung der beiden Blöcke A und B in den Jahren 1974 und 1976 war das NIS-Physikerteam für die nuklearen Berechnungen und die Kernausslegung verantwortlich und trug somit maßgeblich zur Realisierung des sicheren und wirtschaftlichen Betriebs des Kraftwerkes bei. Warum also nicht die Partnerschaft fortführen und dabei das über drei Jahrzehnte erlangte Know-how der Anlage in die Erstellung eines neuen Aktivierungsverfahrens einfließen lassen und für dessen Rückbau zu Nutzen machen?

Bestandsaufnahme: Die nukleare Entsorgung beider Biblis-Blöcke ist sehr kostspielig. Denn ein kleiner Teil kann nicht wie beim Abriss eines Wohnhauses entfernt werden. „Der Betrieb eines Kernkraftwerks hinterlässt radioaktive Gebäudestrukturen und Einbauten, die zuerst zerlegt und anschließend als Sondermüll in speziell dafür konzipierte Behälter entsorgt werden müssen“, erläutert Dirk Bender, Projektleitung Berechnung Reaktorphysik.

Das Kernkraftwerk Biblis rüstet sich für den Rückbau

Darunter befindet sich der Reaktordruckbehälter (RDB), in dessen Innerem der Reaktorkern zu finden ist. Dieser ist von Sicherheitsbarrieren wie dem Biologischen Schild mit einem teilweise über zwei Meter dicken Betonmantel umgeben. Diese Komponenten wurden während des Reaktorbetriebs über viele Jahre durch Neutronen-Beschuss aus dem Reaktorkern aktiviert und sind nun radioaktiv.

Die genaue Kenntnis über die Menge an radioaktiven Gebäudestrukturen und Einbauten sowie deren Grad der Aktivierung ist aus zwei Gründen unverzichtbar. Zum einen benötigt man sie für die Stilllegungsgenehmigung. Zum anderen ist sie für eine kosteneffiziente Rückbauplanung sowie die Minimierung der Strahlenexposition des am Rückbau beteiligten Personals unabdingbar. In der Vergangenheit durchgeführte Aktivierungsberechnungen haben das Aktivitätsinventar, also die Gesamtmenge der radioaktiv strahlenden Reaktorkomponenten, überschätzt – im Fall des Blocks A in Biblis gar um das Siebenfache.

Die damaligen Kostenberechnungen für einen Rückbau konnten nur unter groben Annahmen gemacht werden, da für die Aktivierungsberechnung weder die Betriebshistorie der sich damals noch im Betrieb befindlichen Anlage noch das genaue Abschalt-datum bekannt waren. Der Grad der Aktivierung hängt stark von diesen Einflüssen ab. Außerdem basierten die Berechnungen der radioaktiven Abfallmengen auf veralteten Rechenmethoden. Mit den damals verfügbaren Methoden konnten die verschiedenen Raumrichtungen nur in getrennten Rechnungen erfasst werden. Ein direktes 3-D-Verfahren war nicht realisierbar – und viele Komponenten konnten nur als Ganzes und nicht in Teilen betrachtet werden wie beispielsweise die Hauptkühlmittelleitungen. Dies hatte zur Folge, dass man die benötigte Anzahl an Spezialbehältern überschätzte.

3-D-Potenziale: Die Rechnung geht auf

„Wir gehen davon aus, dass wir dank des neuen 3-D-Aktivierungsverfahrens bei der Planung des Rückbaus eine Einsparung von bis zu 10 % an Gussbehältern gegenüber früheren Planungsberechnungen erzielen können. Das neue Berechnungsverfahren garantiert den Betreibern höhere Planungssicherheit für den Rückbau!“, so Reinhold Paul, Projektleiter der NIS-Abteilung zur Ermittlung von Rückbaukosten. Umgerechnet entspräche dies einem Einsparungspotenzial von € 4 Mio., da ein viel größerer Anteil als „mittel-aktivierter“ oder gar als konventioneller Abfall eingestuft werden kann. „Mittel-“ oder „schwachaktivierter“ Abfall wird in erheblich günstigeren Behältern entsorgt. Somit lohnt es sich, Geld in die Hand zu nehmen, um gleichzeitig ein Vielfaches davon einzusparen! NIS ist mit diesem 3-D-Aktivierungsverfahren gut aufgestellt, um die Betreiber nicht nur in

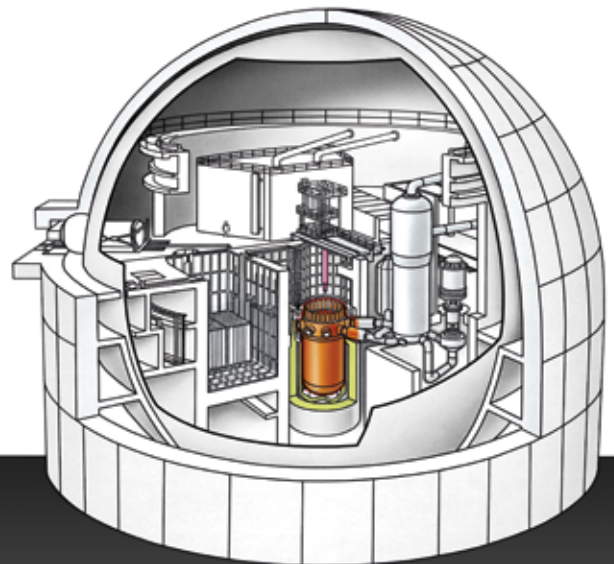
Deutschland, sondern auch weltweit bei einer kosteneffizienzsteigernden Rückbauplanung zu unterstützen.

Monte-Carlo-Verfahren: keine Spielerei, doch voller Durchblick!

Bereits im Jahr 2009 führte NIS anhand eines eigens entwickelten 3-D-Rechenmodells des Kernreaktors Krško in Slowenien Aktivierungsberechnungen durch. Die Berechnungen des neuen 3-D-Aktivierungsverfahrens wurden, wie auch in Krško, anhand des sogenannten „Monte-Carlo-Verfahrens“ (siehe Kasten Seite 32) in dreidimensionaler Geometrie durchgeführt.

Das Verfahren ähnelt der Computertomographie beim Menschen, welche ebenfalls in drei Dimensionen durchgeführt wird. Der Vorteil liegt auf der Hand: Jeder Ort im Modell des Reaktors ist zugänglich. Je nach verfügbarer Rechenleistung ist es möglich, komplexe Strukturen, wie beispielsweise die Schildkühlungsschächte (meterlange gebogene Schächte eingebettet im Beton des Biologischen Schildes) oder Kerninstrumentierungen in beliebig hoher Auflösung auszuleuchten. Insbesondere kann die Neutronenstreuung – auch als Neutronen-Streamingeffekt bezeichnet – in entlegenen Gebieten sichtbar gemacht werden. Dieses 3-D-Rechenmodell bildet die Voraussetzung für einen „Aktivitätsatlas“, der eine Art Reliefkarte des gesamten Reaktors abbildet.

Querschnitt eines Druckwasserreaktors



Das Reaktorgebäude ist eins von mehreren Gebäuden auf dem Kraftwerksgelände. Im Zentrum befindet sich der Reaktor. Lediglich der markierte Bereich wird während des Betriebes durch die Neutronen aus dem Reaktorkern, der vom Reaktordruckbehälter umbaut ist, aktiviert. Der Abbau des Reaktors verschlingt den größten Anteil der Rückbaukosten

Neutron – kleines Teilchen mit durchschlagender Wirkung

Atome sind die kleinsten Teile der chemischen Elemente. Sie sind so winzig, dass erst zehn Millionen Atome aneinandergereiht etwa 1 mm ergeben. Noch viel kleiner – etwa um den Faktor 10.000 – ist der zentrale Atomkern, der von einer Hülle von negativ geladenen Elektronen umgeben ist. Entspräche ein Atom der Größe des Kölner Doms, so wäre im Größenverhältnis der Atomkern ein Kirschkern. Die Bausteine des Atomkerns sind die positiv geladenen Protonen und die Neutronen. Das Neutron ist ladungsneutral – daher sein Name. Neutronen entstehen im Kernreaktor bei der Spaltung bestimmter Uranatome in den Brennelementen, die den Reaktorkern bilden. Im Mittel entstehen bei

der Spaltung eines Urankerns (neben zwei etwa gleich großen Trümmerstücken und frei werdender Energie) zwei bis drei sogenannte Spaltneutronen.

Da fast die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt ist, besteht Materie also überwiegend aus leerem Raum. Je nach seiner Geschwindigkeit und Materialtyp kann das Neutron fast ungehindert Materie durchdringen. Aus diesem Grund wird außerhalb des RDB die Abschirmung derart ausgelegt, dass kein Neutron aus dem Reaktorkern durch den Biologischen Schild nach außen dringen kann.

Aktivierung im Kernkraftwerk – wie entsteht sie?

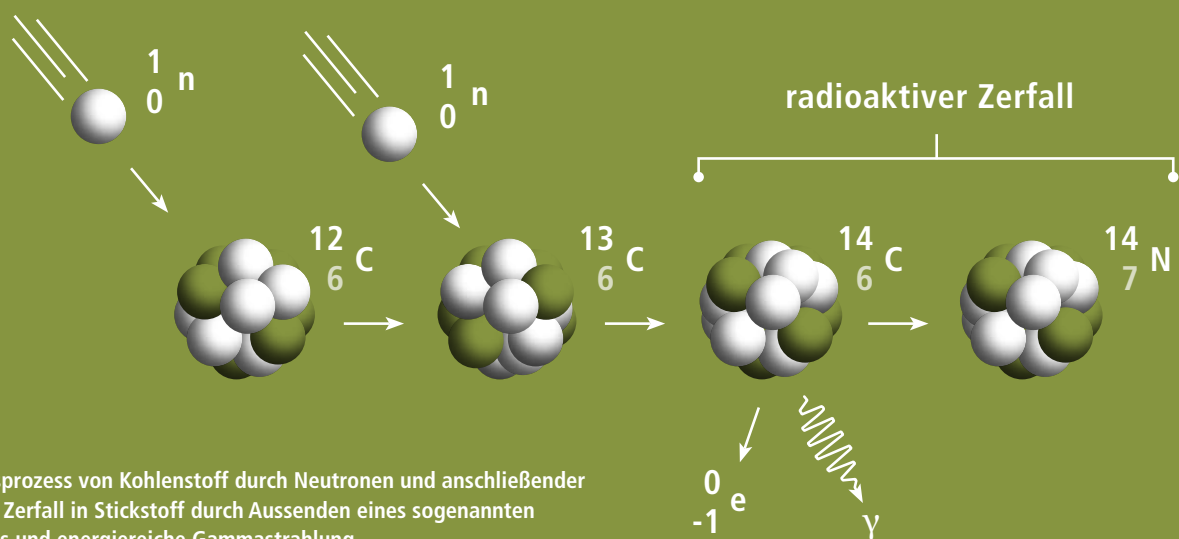
Neutronen sind essenziell für die Energieerzeugung in Kernkraftwerken. Sie machen sich ihre Ladungsneutralität zu Nutze, um die negativ geladene Hülle der Atome ungehindert zu passieren. Trifft ein Neutron auf den Kern eines Uranatoms (den Brennstoff in einem Kernreaktor), so kann es diesen unter Freisetzung von Energie spalten. Zusätzlich werden zwei bis drei „Spaltneutronen“ herausgelöst. Diese schnellen Neutronen können, nachdem sie durch Stöße an anderen Atomkernen abgebremst werden, weitere Urankerne im Brennstoff spalten. Damit ist die bekannte Kettenreaktion gemeint, die den Kernreaktor in Gang hält.

Ein Bruchteil der erzeugten Neutronen entkommt aus dem Reaktorkern – ähnlich einem Heizkessel oder einem Pkw-Motor, bei denen Wärmeenergie ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Dieser Bruchteil ist trotzdem so groß wie in etwa die Menge an Regentropfen, die flächendeckend auf allen Kontinenten der Erde gleichzeitig herunterregnen würde – und das je Sekunde! Ein Teil dieser Neutronen dringt tief in den ca. 2 m dicken Biologischen Schild ein und „aktiviert“ dort den Stahlbeton.

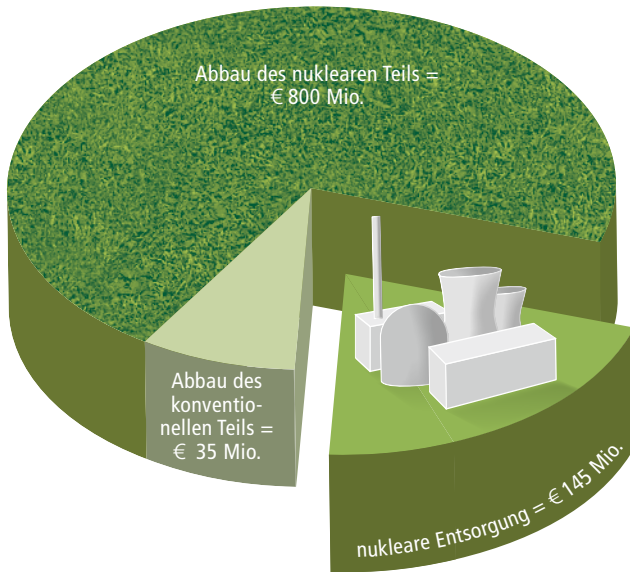
Aktivierung – herkömmliche Materialien werden radioaktiv

Aktivierung ist der Vorgang, bei dem Materialien durch Neutronenstrahlung radioaktiv werden. Nicht radioaktiver Kohlenstoff-12 (chem. ^{12}C) beispielsweise, der in geringen Mengen dem Stahl zugefügt wird, wandelt sich unter Neutronenbeschuss in den radioaktiven Kohlenstoff-14 (chem. ^{14}C), bekannt aus der C14-Datierungsmethode.

Das C14 mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren hat im Rückbau keine große Bedeutung. Ganz im Gegensatz zu manchen Stoffen, die leicht aktivierbar sind, da ihre Kerne besonders leicht Neutronen einfangen. Zum Beispiel Kobalt: Zwar nur in Spuren im Stahl enthalten, wird es äußerst leicht aktiviert und bildet trotz seiner vergleichbar kurzen Halbwertszeit von 5,3 Jahren den dominierenden radioaktiven Strahler im Stahl. Die Halbwertszeit gibt die Dauer an, bei der sich die Aktivität eines Stoffes halbiert hat.



Aktivierungsprozess von Kohlenstoff durch Neutronen und anschließender radioaktiver Zerfall in Stickstoff durch Aussenden eines sogenannten Betateilchens und energiereicher Gammastrahlung

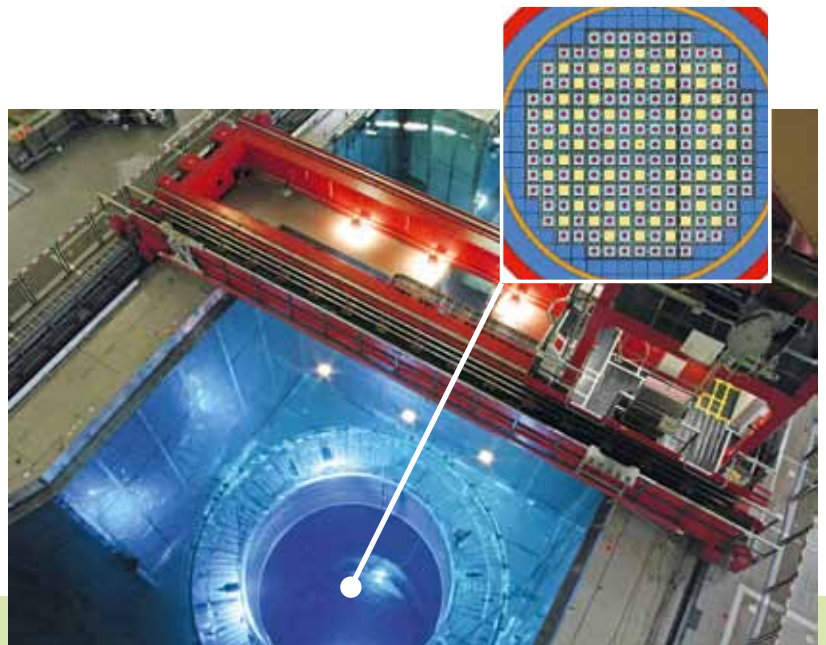


Rückbaukosten eines Druckwasserreaktors in Deutschland:

Gesamtkosten für den Rückbau zur „grünen Wiese“ etwa € 1 Mrd.

Rund 680 Gussbehälter sind für die Verpackung „hoch-aktivierter“ Komponenten vorgesehen. Eine Einsparung von etwa 50 Gussbehältern ist bei der Rückbauplanung mit Hilfe des neuen 3-D-Aktivierungsverfahrens möglich

Geöffneter Reaktordruckbehälter mit Blick auf die Brennelemente des Reaktorkerns, daneben der Ausschnitt des 3-D-Aktivierungsmodells: Der Kern ist die Quelle der Neutronen, die während des Reaktorbetriebs den Reaktorkern verlassen und Teile des Reaktor Gebäudes aktivieren



Die Innovation des 3-D-Aktivierungsverfahrens

Neu ist das Vereinen der nuklearen Mitrechnung, das sozusagen den Lebenslauf eines Reaktors abbildet, im Falle von Biblis seit der Inbetriebnahme vor 39 Jahren. „Mit der erfolgreichen Anbindung der Betriebsseite an die Rückbauseite in der Aktivierungsberechnung betreten wir Neuland“, äußert sich stolz Dr. Stefan Jaag, einer der Projektbeteiligten, dem dies gelang. „Das hat vor uns noch keiner gemacht!“

Damit dies funktionierte, musste Jaag in das Monte-Carlo-Programm eingreifen und den Rechencode teilweise neu programmieren. Wieso das Einbinden der betrieblichen Mitrechnungen des Reaktorbetriebs von großer Bedeutung ist, lässt sich am einfachsten anhand der Metapher des Regens erklären. Damit lässt sich der Strom der Neutronen, die aus dem Reaktorkern entkommen, symbolisieren: In Wirklichkeit regnet es nicht überall und auch nicht dauerhaft. Daher ist es wichtig, die Stillstandzeiten (in denen praktisch keine Spaltneutronen im Reaktorkern erzeugt



Eine der acht Hauptkühlmittelleitungen im KKW Biblis mit über 1 m Durchmesser: Die Rohre des heißen Strangs leiten das auf knapp 300 °C im Reaktor erhitzte und unter 155 bar stehende Wasser zu den Dampferzeugern. Sie wurden zum Teil durch die Neutronenstrahlung aus dem Reaktorkern aktiviert

werden und damit auch nicht entweichen) sowie andere wichtige Parameter aus der Betriebsvergangenheit des Kraftwerks zu berücksichtigen.

Jeder Reaktorblock ist im Rechenmodell mit jeweils mehr als 100.000 „Detektorzellen“ überspannt. Es wird der aus dem Reaktorkern austretende Neutronenfluss während der 39 Betriebsjahre simuliert und die Anzahl der eintreffenden Neutronen in den Detektorzellen über die Zeit registriert. Mit dieser Information wird die Aktivität in jeder Detektorzelle berechnet. Alleine der RDB besitzt mehr als 3.000 solcher Zellen!

Die Modelle der beiden Biblis-Reaktoren wurden in enger Abstimmung mit den Rückbauexperten der NIS entwickelt. Sie konnten ihre gesammelten Erfahrungen beim Rückbauprojekt Stade in der Modellierungsphase des 3-D-Aktivierungsverfahrens einfließen lassen. So wurde im Fall des RDB die Gitteranordnung der Detektorzellen mit der Zerlege- und Verpackungsstrategie harmonisiert. Im Ergebnis führt das zu einer Optimierung der Anzahl benötigter Behälter. Schließlich speicherte man die Ergebnisse der Aktivierungsberechnungen in einer „Aktivitätsdatenbank“. Durch eine einfache Eingaberoutine können die Aktivitätswerte für jeden beliebigen Ort und Ausschnitt im Reaktor ausgewiesen wer-

den. Als nächster Entwicklungsschritt wird die Datenbank an ein 3-D-Aktivitäts-Visualisierungswerkzeug angekoppelt, mit dem Ausschnitte direkt am Bildschirm herangezoomt oder von einer anderen Perspektive aus betrachtet werden können.

Parallel Processing spart Zeit

Der Rechenaufwand der Monte-Carlo-Rechnung ist immens: Ein einzelner Standard-Desktop-PC hätte ein ganzes Jahr lang rechnen müssen (und das für einen Reaktorblock). Dank Parallel Processing konnte die Rechendauer auf wenige Tage reduziert werden. Diese Rechenleistung war nötig, um eine hohe räumliche Auflösung des Aktivierungsgrads zu erhalten. Denn nur dadurch ist es möglich, „Hotspots“ (Bereiche mit besonders hoher Radioaktivität) zu identifizieren. Die genaue Kenntnis über die Verteilung der Aktivierung im Reaktor hilft, die Dosisbelastung des Rückbaupersonals effektiv auf ein Minimum zu reduzieren, weil der Mannschaft beim Betreten des Reaktorgebäudes die Orte der Hotspots bekannt sind und sie diese somit meiden kann.

„Mit unserem hochauflösenden 3-D-Berechnungsmodell konnten wir sogar Erfahrung für den Bau neuer Kernkraftwerke sammeln“, so Projektleiter Dirk Bender. „Wir konnten erkennen,

Das Monte-Carlo-Verfahren – clever analysiert!

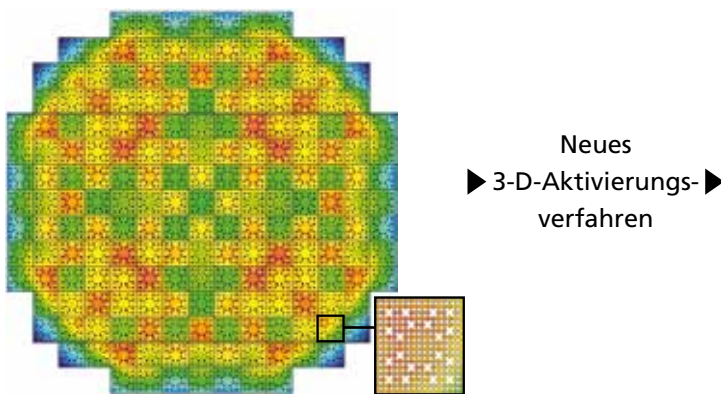
Monte-Carlo-Simulationen werden verwendet, wenn analytische Formeln für die Bewertung von Vorgängen in der Natur versagen oder deren Lösungsweg zu komplex ist. Fragestellungen in der Welt der Finanzen und vieles mehr können ebenso mit Monte-Carlo-Ansätzen relativ einfach beantwortet werden.

In diesem Verfahren aus der Stochastik (einem Teilgebiet der Mathematik) spielen sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente eine wichtige Rolle. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie werden Probleme numerisch gelöst. Dabei setzt man auf das Gesetz der großen Zahl (in unserem Fall auf eine Vielzahl von Neutronen). Die Zufallsexperimente werden durch die Erzeugung von Zufallszahlen (sprich: durch das Würfeln von Zahlen – in Anlehnung an das Casino in Monte Carlo) durchgeführt.

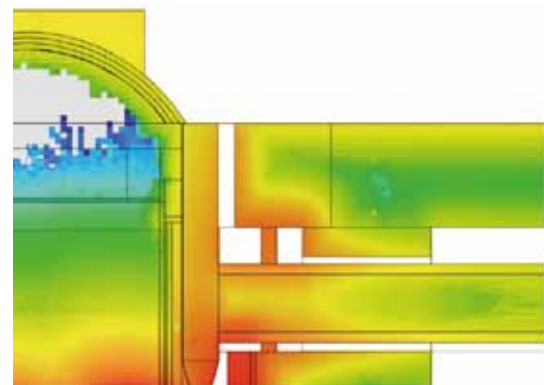
Konkret wird im 3-D-Aktivierungsverfahren die Monte-Carlo-Methode für das Simulieren des Wegs angewendet, den ein Neutron beschreitet – von seiner Erzeugung irgendwo im Reaktorkern bis zu seiner Vernichtung durch Kerneinfang. Theoretisch wäre es möglich, den Weg jedes einzelnen im Reaktor erzeugten Neutrons zu simulieren. Durch ausgefeilte Hilfsmittel aus der Statistik lässt sich die zu simulierende Anzahl an Neutronen auf ein beherrschbares Maß reduzieren, das bereits handelsübliche Desktop-PCs in einer angemessenen Zeit bewältigen können. Die erhaltenen Ergebnisse der Monte-Carlo-Rechnung erfüllen die Genauigkeitsanforderungen, die üblicherweise an solche Problemstellungen gestellt werden.

Vergangenheit trifft auf Zukunft:

Das „Verheiraten“ des Leistungsbetriebs des Reaktors mit dessen Rückbau



Neues
▶ 3-D-Aktivierungs-
verfahren ▶



Darstellung der Intensitätsverteilung der Reaktorneutronen im Ausschnitt eines 3-D-Modells des oberen Reaktordruckbehälters und der Loopteilung: rot = höhere Neutronenintensität und somit höhere Aktivität

Typische Leistungsverteilung in einem laufenden Kernkraftwerk: Darstellung eines Reaktorkerns mit seinen 193 Brennelementen. Rote Stellen erzeugen größere Wärmeleistungen und mehr Neutronen als die blau markierten Bereiche

welche entlegenen Bereiche im Reaktorgebäude durch Neutronenbeschuss aktiviert werden, und können somit Empfehlungen für bessere Abschirmungen geben.“ Beispielsweise ließen sich in diesen Bereichen alternative Materialien verwenden, die nur im geringen Maße durch Neutronenbeschuss aktiviert werden.

Da der Standort Biblis bald mit dem Rückbau beginnen wird, stehen als nächster Schritt Beprobungsmessungen am Reaktordruckbehälter, dem Biologischen Schild und weiteren aktivierten Komponenten auf der Agenda. Der Vergleich der Messungen mit der Rechnung gilt als Lackmustest für das 3-D-Aktivierungsverfahren. Wir sind gespannt auf das Ergebnis und werden berichten!

Neutronen-Intensitätsverteilung am Senkrechtschnitt des 3-D-Aktivierungsmodells des KKW Biblis, Reaktorblock B: Vom Reaktordruckbehälter eingeschlossen ist der Reaktorkern (schwarz). Stärkere Aktivierung (rot) herrscht in Kernnähe. Die Aktivität nimmt über grün zu blau ab. Bereiche des Bodens der Reaktorgrube sowie der Bereich im Reaktordruckbehälter unterhalb des Deckels weisen keine Reaktorneutronen auf (weiß). Teile dieser Komponenten können kostengünstig als konventioneller Abfall entsorgt werden, da sie nicht aktiviert worden sind

