

## Sicherheitsstatus des Kernkraftwerks Beznau

Aktualisierung der Analyse der Ergebnisse des EU-  
Stresstests des Kernkraftwerks Beznau

Darmstadt, August  
2017

Der Bericht gibt die Auffassung  
und Meinung des Auftrags-  
nehmers wieder und muss nicht  
mit der Meinung des Auftrags-  
gebers übereinstimmen.

### **Autorinnen und Autoren**

Dr. rer. nat. Christoph Pistner  
Dipl.-Ing. Simone Mohr

### **Im Auftrag des**

Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-  
Württemberg

### **Geschäftsstelle Freiburg**

Postfach 17 71  
79017 Freiburg

#### **Hausadresse**

Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg  
Telefon +49 761 45295-0

### **Büro Berlin**

Schicklerstraße 5-7  
10179 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0

### **Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>9</b>
<b>1. Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>19</b>
<b>2. Grundsätze des Auslegungskonzepts</b>	<b>23</b>
2.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	23
2.2. Darlegungen des Betreibers	24
2.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde	26
2.4. Auflagen und Nachrüstungen	28
2.5. Stellungnahme	30
<b>3. Erdbeben</b>	<b>35</b>
3.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	35
3.2. Forschungsarbeiten zu den in der Schweiz zu unterstellenden Gefährdungsannahmen	36
3.2.1. Pegasos	36
3.2.2. PRP Intermediate und PRP	37
3.2.3. Schweizer Erdbebendienst National Hazard 2015 Projekt	38
3.3. Darlegungen des Betreibers	39
3.3.1. Erdbebengefährdung des KKB	39
3.3.2. Fragility-Analysen des Betreibers	42
3.3.3. Erfolgte Erdbebennachrüstungen	42
3.4. Darlegungen der Aufsichtsbehörde	43
3.4.1. Vorgaben zum Erdbebennachweis	43
3.4.2. Aktualisierte Gefährdungsannahmen	44
3.4.3. Fragility-Analysen	49
3.5. Auflagen und Nachrüstungen	51
3.6. Stellungnahme	53
3.6.1. Grundausslegung der Anlage Beznau	53
3.6.2. Sicherheitsmargen	56
<b>4. Überflutung</b>	<b>61</b>
4.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	61
4.2. Darlegungen des Betreibers	62
4.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde	62

4.4.	<b>Auflagen und Nachrüstungen</b>	<b>63</b>
4.5.	<b>Stellungnahme</b>	<b>64</b>
<b>5.</b>	<b>Brennelement-Lagerbecken</b>	<b>67</b>
5.1.	Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	67
5.2.	Darlegungen des Betreibers	68
5.3.	Darlegungen der Aufsichtsbehörde	68
5.4.	Auflagen und Nachrüstungen	69
5.5.	Stellungnahme	71
<b>6.</b>	<b>Elektrische Energieversorgung</b>	<b>75</b>
6.1.	Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	75
6.2.	Darlegungen des Betreibers	76
6.3.	Darlegungen der Aufsichtsbehörde	77
6.4.	Auflagen und Nachrüstungen	77
6.5.	Stellungnahme	80
<b>7.</b>	<b>Kühlwasser</b>	<b>83</b>
7.1.	Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	83
7.2.	Darlegungen des Betreibers	84
7.3.	Darlegungen der Aufsichtsbehörde	85
7.4.	Auflagen und Nachrüstungen	85
7.5.	Stellungnahme	85
<b>8.</b>	<b>Extreme Wetterbedingungen</b>	<b>89</b>
8.1.	Sachstand	90
8.2.	Stellungnahme	95
<b>9.</b>	<b>Reaktordruckbehälter</b>	<b>97</b>
9.1.	<b>Sachstand</b>	<b>98</b>
9.1.1.	Versprödungszustand der Reaktordruckbehälter der Anlage KKB vor der Entdeckung von Befunden	98
9.1.1.1.	Versprödungszustand des RDB KKB 1	99
9.1.1.2.	Probleme beim Thermoschocknachweis des RDB KKB 1	102
9.1.1.3.	Versprödung des RDB KKB 2	105
9.1.2.	Befunde an den Reaktordruckbehältern der Anlage KKB	107
9.1.2.1.	Befunde am RDB KKB 1	107
9.1.2.2.	Befunde am RDB KKB 2	110
9.1.2.3.	Anwendungsgrenzen des Master-Curve Verfahrens	112
9.2.	<b>Stellungnahme</b>	<b>112</b>

9.2.1.	Versprödung der RDBs	113
9.2.2.	Befunde in den Reaktordruckbehältern	116
<b>10.</b>	<b>Weitere sicherheitsrelevante Schwachstellen</b>	<b>119</b>
10.1.	Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)	119
10.2.	Darlegungen des Betreibers	119
10.3.	Darlegungen der Aufsichtsbehörde	120
10.4.	Auflagen und Nachrüstungen	122
10.5.	Stellungnahme	123
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Vergleich der Gefährdungskurven für die Geländeoberfläche des Standorts Beznau von Pegasos 2004 und PRP 2013	38
Abbildung 3-2:	Vergleich der Gefährdungskurven für den Felshorizont des Standorts Beznau von PRP 2013 (links) und PRP-IH (rechts)	38
Abbildung 3-3:	Vergleich Uniform Hazard Spektren an Geländeoberfläche, Überschreitungshäufigkeit $10^{-4}/a$ , Dämpfung 5%, Pegasos und PRP-Intermediate	40
Abbildung 3-4:	PRP Beznau horizontale Bodenbeschleunigung, Geländeoberfläche, Überschreitungshäufigkeit $10^{-4}/a$ , 5% Dämpfung	41
Abbildung 3-5:	PRP Beznau horizontale Bodenbeschleunigung, Fundamentniveau -15 m, Überschreitungshäufigkeit $10^{-4}/a$ , 5% Dämpfung	41
Abbildung 3-6:	Vergleich der Bodenantwortspektren (horizontale Komponente) von PRP und PRP-SED bei Fundamentniveau -15m für eine Überschreitungshäufigkeit von $10^{-4}/a$ (Mittelwert)	48
Abbildung 3-7:	Vergleich der Bodenantwortspektren (horizontale Komponente) von PRP-IH und PRP-SED bei Fundamentniveau -15m für eine Überschreitungshäufigkeit von $10^{-4}/a$ (Mittelwert)	48
Abbildung 3-8:	PRP-SED Bodenantwortspektren (horizontale Komponente) an der Geländeoberfläche für eine Überschreitungshäufigkeit von $10^{-4}/a$	49
Abbildung 9-1:	Prinzipdarstellung Sprödbruchsicherheitsnachweis	97
Abbildung 9-2:	Chemische Zusammensetzung der Schmiederinge C und D von Block 2	99
Abbildung 9-3:	Auswertung des letzten Probensatzes T (KKB 1) entsprechend einer Betriebszeit von über 60 VLJ mit allen 3 Methoden	100
Abbildung 9-4:	$RT_{Ref}$ bestimmt nach Master-Curve Methode II B	101
Abbildung 9-5:	$RT_{Ref}$ bestimmt nach konventioneller Methode I, ergänzt um den letzten Probenwert, Fluenzen bezogen auf die RDB-Innenwand	101
Abbildung 9-6:	Constraint-Korrektur und Constraint-korrigierte Referenztemperaturen	104
Abbildung 9-7:	Bewertung des Kernnahtbereichs	104
Abbildung 9-8:	KKB, Block 2, $RT_{Ref}$ nach klassischer Methode I und Probenwerte $RT_{NDT(j)}$	105
Abbildung 9-9:	KKB, Block 2, $RT_{Ref}$ nach Master-Curve Methode II B	106
Abbildung 9-10:	KKB, Block 2, Resultate der Probenprüfungen von Probensatz P	106
Abbildung 9-11:	Ursprünglicher Zeitplan für die Überprüfung des Reaktordruckbehälters von KKB, Block 1	107
Abbildung 9-12:	Anpassung des Zeitplans zum „Safety Case“ des Reaktordruckbehälters von KKB, Block 1	108
Abbildung 9-13:	KKB, Block 1, Umfangsverteilung der Ultraschallanzeigen, Ring C des Reaktordruckbehälters	109
Abbildung 9-14:	Vergleich zwischen den Ultraschallanzeigen der Replika mit denen von Ring C	110

Abbildung 9-15:	Sprödbbruchreferenztemperatur für Ring C des RDB von Block 2 nach 54 VLJ mit Methode II B	111
Abbildung 10-1:	Sicherheitsreserven des Containments am Beispiel des KKB gemäß (Richner 2016)	120

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Erdbebenauslegung bzw. –requalifikation der BK-I-Gebäude des KKB (Beschleunigungen am Fundament)	45
Tabelle 3-2:	Gefährdungsannahmen und Robustheit des Standorts KKB	54
Tabelle 3-3:	Vergleich der Entwicklung der Gesamt-CDF und der seismischen CDF	58
Tabelle 8-1:	Provisorische Gefährdungsannahmen für das KKB	93
Tabelle 8-2:	Für die Blitzschutztechnisch speziell zu schützenden Einrichtungen anzusetzende Blitzstromparameter	94

## Zusammenfassung

Als eine Konsequenz aus der Reaktorkatastrophe am 11. März 2011 in der japanischen Anlage Fukushima Daiichi sind auf verschiedenen nationalen und internationalen Ebenen Überprüfungsprozesse in Gang gesetzt worden. Schwerpunkt der anlagenspezifischen Überprüfungen war eine Analyse ausgewählter Sicherheitsaspekte unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus dem Unfallablauf in Fukushima, auch unter Annahmen, die über die bisherigen Auslegungsgrenzen der Anlagen hinausgehen. Auf europäischer Ebene wurde hierzu der sogenannte EU-Stresstest durchgeführt.

Für Baden-Württemberg sind grenznahe Anlagen von besonderer Bedeutung. In der Schweiz zählen hierzu die schweizerischen Druckwasserreaktoren Beznau I und II (Inbetriebnahme 1969 bzw. 1971), die zu den ältesten Anlagen weltweit gehören. Das Land Baden-Württemberg kann bei schweren Unfällen in den genannten Kernkraftwerken betroffen sein.

Das Öko-Institut hat im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Oktober 2012 ein Gutachten vorgelegt (Brettner et al. 2012), in dem Aussagen zu bislang im Rahmen des EU-Stresstests noch fehlenden oder unzureichend betrachteten Sicherheitsaspekten abgeleitet wurden. Weiterhin wurde anlagenspezifisch Hinweisen auf sicherheitstechnische Schwachstellen nachgegangen. Die Ergebnisse wurden dort anhand der Themenfelder Erdbeben, Überflutung, Brennelement-Lagerbecken, elektrische Energieversorgung und Kühlwasser sowie weiterer sicherheitsrelevanter Schwachstellen dargestellt.

Ziel dieses Gutachtens ist eine Aktualisierung der Bewertungen der sicherheitstechnischen Schwachstellen der Anlage Beznau unter Berücksichtigung der seit Abschluss des EU-Stresstests geplanten bzw. bereits erfolgten sicherheitstechnisch relevanten Nachrüstungen. Neben den oben genannten Themenfeldern hat die Aufsichtsbehörde ENSI in der Schweiz das Themenfeld „Extreme Wetterbedingungen“, das bereits im EU-Stresstest 2011 behandelt wurde, als ein Schwerpunktthema behandelt. Weiterhin spielt die altersbedingte Versprödung des Reaktordruckbehälters (RDB) im Zusammenhang mit im RDB der Anlage Beznau vorgefundenen Anzeigen eine wichtige Rolle bei der Frage des Sicherheitsstatus der Anlage Beznau.

Für eine Bewertung des Sicherheitsstatus ist zunächst eine Berücksichtigung der Grundausslegung der Anlage erforderlich. Darüber hinaus werden themenspezifisch unterschiedliche Reserven ausgewiesen. Für die Bewertung wurden die im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) definierten Robustheitslevel herangezogen. Dieser Bewertungsmaßstab wird auch im Rahmen des hier vorgelegten Gutachtens zugrunde gelegt, wobei er hinsichtlich des in Deutschland gültigen Sicherheitsstatus gemäß der zusätzlichen Anforderungen aktualisiert wird, wie sie beispielsweise im Rahmen des deutschen nationalen Aktionsplans formuliert wurden. Dazu wird im Rahmen der Stellungnahme zu den jeweiligen Themenfeldern auf die Weiterentwicklung des Sicherheitsstatus in Deutschland eingegangen. Auf dieser Basis erfolgt eine aktualisierte Bewertung, wobei für die Anlage Beznau jeweils vorhandene Vor- oder Nachteile gegenüber dem somit definierten Sicherheitsstatus ausgewiesen werden.

## Grundsätze des Auslegungskonzepts

Die Anlage Beznau unterscheidet sich in ihrem grundsätzlichen Auslegungskonzept von den in Deutschland aktuell noch betriebenen Druckwasserreaktoren. Der Betreiber der Anlage KKB hat in einer knappen Erwiderung auf das Gutachten des Öko-Instituts von 2012 festgestellt, dass wichtige Sicherheitssysteme nicht berücksichtigt seien und die Darstellung bezüglich der Möglichkeiten für eine Blockstützung nicht die Gegebenheiten in der Anlage KKB widerspiegele.

Demgegenüber hat ENSI bestätigt, dass die technischen Merkmale der fest installierten Sicherheitssysteme überwiegend richtig dargestellt und die vorgenommene Bewertung auf Basis des definierten Bewertungsmaßstabs im Wesentlichen korrekt sei.

Hinsichtlich der vorhandenen Kühlmöglichkeiten und den Möglichkeiten zur Blockstützung wurden diese bereits in unserem Gutachten (Brettner et al. 2012) gewürdigt, wir leiten aus den diesbezüglichen Aussagen des Betreibers daher keine Änderungsnotwendigkeit an den vorgenommenen Bewertungen ab.

Die Aufsichtsbehörde verwies darauf, dass im Unterschied zum deutschen Regelwerk im KKW Beznau eine Instandhaltung an einer Redundante in den Einrichtungen zur Störfallbeherrschung während des Leistungsbetriebs grundsätzlich nicht zulässig ist, und daher kein Instandhaltungskriterium zu erfüllen sei. Das schweizerische Regelwerk fordert lediglich die Berücksichtigung eines Einzelfehlers unabhängig vom auslösenden Ereignis.

Hierzu ist zunächst einschränkend festzuhalten, dass für die Anlage KKB für verschiedene, als auslösendes Ereignis der Sicherheitsebene 3 zugeordnete Ereignisse aus probabilistischen Gründen das mit dem Einzelfehler überlagerte Ereignis als auslegungsüberschreitend betrachtet wird, die Nachweise zur Störfallbeherrschung daher ohne Überlagerung eines Einzelfehlers geführt werden. Eine eingeschränkte Berücksichtigung eines Einzelfehlers bei auslösenden Ereignissen, die der Sicherheitsebene 3 zuzuordnen sind, stellt aus unserer Sicht eine Abweichung von internationalen Anforderungen und damit einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Weiterhin ist festzuhalten, dass der in Deutschland realisierte (n+2) Redundanzgrad durch Instandhaltungsmaßnahmen während des Leistungsbetriebs für begrenzte Zeiten eingeschränkt verfügbar sein kann. Für den Großteil der Zeiten des Leistungsbetriebs ist dieser Redundanzgrad jedoch als uneingeschränkt verfügbar anzusehen. Auch bei den grundsätzlich erforderlichen Instandhaltungsarbeiten an einzelnen Redundanten während des Nichtleistungsbetriebs (also bei abgeschalteter Anlage) ist mindestens ein einzelfehlerfester Zustand gegeben. In der Anlage KKB ist nicht für alle Sicherheitsfunktionen und nicht bei allen Ereignissen eine Einzelfehlerfestigkeit oder gar eine Einzelfehlerfestigkeit bei gleichzeitig unterstelltem Instandsetzungsfall gegeben. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Das ENSI hat weiterhin darauf verwiesen, dass insbesondere die auf Sicherheitsebene 4 vorhandenen, nicht fest installierten Sicherheitseinrichtungen der Anlage KKB nicht angemessen berücksichtigen würden, da diese Sicherheitsebene in Deutschland regulatorisch erst seit kurzem erfasst sei.

Diesbezüglich ist festzustellen, dass die in der Anlage KKB auf Sicherheitsebene 4 vorhandenen Maßnahmen und Einrichtungen in Deutschland ebenfalls bereits vor Fukushima eingeführt und auch nach Fukushima weiter ergänzt wurden – vergleichbar zu den in der Anlage KKB nach Fukushima ergänzten mobilen Einrichtungen. Schließlich hat bereits der Betreiber selbst festgestellt, dass die auf der Sicherheitsebene 4 vorhandenen Maßnahmen und Einrichtungen nicht dazu herangezogen werden können, vorhandene Sicherheitsdefizite auf der Sicherheitsebene 3 zu kompensieren. Die auf der Sicherheitsebene 4 im Bereich des vorbeugenden und mitigativen Notfallschutzes implementierten Maßnahmen wurden von uns umfassend berücksichtigt. Dessen ungeachtet verbleiben aus unserer Sicht jedoch spezifische Defizite insbesondere auf den vorgelagerten Sicherheitsebenen, die durch Einrichtungen auf der Sicherheitsebene 4 nicht kompensiert werden. Wir leiten aus den diesbezüglichen Aussagen der Aufsichtsbehörde daher keine Änderungsnotwendigkeit an den in (Brettner et al. 2012) vorgenommenen Bewertungen ab.

## Erdbeben

Mit den Vorhaben „Pegasos“ und „Pegasos Refinement Project“ (PRP) wurden in den letzten Jahrzehnten die Erdbebengefährdungsannahmen in der Schweiz umfassend neu bestimmt. Es ist davon auszugehen, dass die aktuellen Gefährdungsannahmen dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die weiteren Eingrenzungen der Unsicherheiten der Gefährdungsannahmen verstärken ihre Belastbarkeit. Die Festlegungen des ENSI zu den aktuellen Gefährdungsannahmen des Standortes Beznau durch das PRP zeigen, dass die ursprünglichen PGA-Werte der ersten Pegasos-Studie fast wieder erreicht werden. Die aktuellen Gefährdungsannahmen liegen höher, als die bisher von Axpo der Nachweisführung zugrunde gelegten Anforderungen (PRP-Intermediate Hazard).

Während in Deutschland die Grundausslegung gegen ein Erdbeben mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr gefordert ist, ist für das Sicherheitserdbeben gemäß Schweizer Regelwerk die Anforderung festgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten der zugehörigen Einwirkungen höchstens  $10^{-4}$  pro Jahr betragen soll. Hinsichtlich der zur Ermittlung der Erdbebeneinwirkungen verwendeten Methoden gehen wir davon aus, dass die derzeit gültigen Gefährdungskurven für deutsche Anlagen größere Gemeinsamkeiten mit der Gefährdungskurve aufweisen, die der noch 2011 gültigen Auslegung des KKB zu Grunde lag, als mit den im Rahmen des Projekt Pegasos bzw. des PRP bestimmten Gefährdungskurven. Da für die Anlage Beznau ausgehend von den Gefährdungsannahmen des Jahres 2011 auch noch bei einem Erdbeben mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr Reserven zur Beherrschung bestünden, leiten wir hieraus bezüglich der Grundausslegung der Anlage Beznau keinen bewertungsrelevanten Unterschied im Sicherheitsstatus ab. Allerdings liegt bislang kein Nachweis durch den Betreiber vor, dass auch für die aktuell gültigen Gefährdungsannahmen das Sicherheitserdbeben auslegungsgemäß beherrscht wird.

Auch hinsichtlich der auslegungsgemäß verfügbaren Pfade zur Nachwärmeabfuhr bei Erdbeben ausgehend vom Leistungsbetrieb ergibt sich kein bewertungsrelevanter sicherheitstechnischer Vor- oder Nachteil der Anlage KKB. Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand steht in der Anlage KKB eine geringere Anzahl an Strängen in der Qualität eines Sicherheitssystems zur Verfügung als in den deutschen Anlagen. Dies wird auch durch die Forderung des ENSI unterstrichen, die Untersuchung der Sicherheitsmargen nicht nur auf den Zustand „heiß abgestellt“ zu beschränken, sondern auch den Zustand „kalt abgestellt“ zu analysieren.

Insgesamt entspricht die Grundausslegung der Anlage Beznau aufgrund der offenen Nachweise zur Beherrschung des aktuell gültigen Bemessungserdbebens und den Einschränkungen bei den zur Beherrschung des Bemessungserdbebens zur Verfügung stehenden Sicherheitssystemen nicht dem Sicherheitsstatus deutscher Anlagen, was einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage Beznau darstellt.

Da bei der ursprünglichen Auslegung der Systeme, Strukturen und Komponenten gegen das Sicherheitserdbeben in der Regel Konservativitäten und Sicherheitszuschläge berücksichtigt wurden, bestehen ggfs. noch Sicherheitsmargen, die es zu bewerten gilt, um eine Aussage zur Robustheit der Anlage zu machen.

Der Abfahrpfad 2 wird vom ENSI gegenwärtig als der „seismisch robustere“ eingestuft. Nach unserer Kenntnis wurden an diesem Pfad jedoch keine Nachrüstungen vorgenommen. Nimmt man für den Abfahrpfad 2 die gleiche Robustheit wie 2011 an, so ergibt sich mit der neu zu unterstellenden Gefährdungsannahme des ENSI ein Sicherheitsfaktor von 1,18 bei der Beherrschung eines Erdbebens mit einer Eintrittsrate von  $10^{-4}/a$ . Für ein Erdbeben mit einer Eintrittsrate von  $10^{-5}/a$  wäre die Erdbebenauslegung nicht mehr ausreichend.

Es wird auf dieser Basis deutlich, dass ausgehend von der ursprünglichen Auslegung des KKB, selbst unter Berücksichtigung der bekannten, zwischenzeitlichen Ertüchtigungsmaßnahmen, die Anlage die Auswirkungen eines schweren Erdbebens entsprechend der aktuellen Gefährdungsannahmen weitgehend ohne Sicherheitsmargen beherrschen muss. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Angesichts des weiterhin hohen Anteils der erdbebenbedingten Versagenswahrscheinlichkeit an der gesamten Kernschadenshäufigkeit – trotz der im Rahmen von AUTANOVE und sonstiger Nachrüstungen bereits erzielten höheren Robustheit der Anlage KKB – ist weiterhin von einem nicht ausgewogenen Sicherheitskonzept auszugehen, so dass aus sicherheitstechnischer Sicht – wie auch bereits von ENSI gefordert – weitere Ertüchtigungen der Anlage KKB zu fordern sind.

## **Überflutung**

Bereits in (Brettner et al. 2012) haben wir festgestellt, dass die schweizerische Regelwerksvorgabe, als Bemessungsereignis das 10.000-jährliche Hochwasser zu Grund zu legen, den Vorgaben im deutschen Regelwerk und dem Basislevel im RSK Stresstest entspricht. Auch die zwischenzeitlich vom Betreiber vorgelegten und von ENSI geprüften zusätzlichen Nachweise bestätigen, dass die Anlage KKB für dieses Hochwasser ausgelegt ist.

Auch die darüber hinaus für die Anlage KKB ausgewiesenen Reserven von über einem Meter bei Berücksichtigung der Sicherheitssysteme, von sogar mehreren Metern bei Berücksichtigung ausschließlich der Notstandssysteme ist erheblich und mit den für die deutschen Anlagen ausgewiesenen Reserven im Bereich zwischen 0,5 und 1 m mindestens gleichwertig.

Für die Beherrschung eines Hochwasserereignisses in der Anlage KKB stehen auslegungsgemäß ausgehend vom Leistungsbetrieb, also bei verfügbaren Dampferzeugern, das Hilfsspeisewassersystem sowie das Notstandssystem zur Verfügung. Aufgrund der pro Block nur einmal vorhandenen Brunnenwasserpumpen entspricht dies einer grundsätzlich zweisträngigen Auslegung. Durch die Nachrüstungen im Rahmen von AUTANOVE steht mit dem Notspeisesystem ein zusätzlicher Strang zu Bespeisung der Dampferzeuger auch bei Hochwasser zur Verfügung, der jedoch für den langfristigen Betrieb ebenfalls auf die Notstand-Brunnenwasserpumpen angewiesen ist

Ausgehend vom Anlagenstillstand, also bei unverfügbaren Dampferzeugern, stehen in der Anlage KKB aufgrund des auslegungsgemäß nicht verfügbaren primären Nebenkühlwassersystems ausschließlich Pfade zur Nachwärmeabfuhr zur Verfügung (Notstand-Rezirkulation, Nachwärmeabfuhr mit Feed-and-Boil, AM-Maßnahmen), die in Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft würden.

Insgesamt stellen diese Auslegungsmerkmale des KKB, insbesondere im Hinblick auf die Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern, aus unserer Sicht gegenüber dem Sicherheitsstatus der noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen einen sicherheitstechnischen Nachteil dar.

## **Brennelement-Lagerbecken**

Im Hinblick auf den Erhalt des Wasserinventars im Becken hat die Aufsichtsbehörde bestätigt, dass in KKB Maßnahmen gegen einen Wasserverlust aufgrund Saughebewirkung bei Versagen von anschließenden Rohrleitungen ergriffen werden. Der tatsächliche Umsetzungsstand ist nicht bekannt, Ende 2016 wurde die Umsetzung der Maßnahmen noch nicht als abgeschlossen bestätigt. Die offenen Maßnahmen hinsichtlich einer Verhinderung eines Wasserverlusts aus dem

Brennelement-Lagerbecken durch Saughebewirkung stellen aus unserer Sicht bis zur endgültigen Umsetzung der Maßnahmen einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Weitere, von ENSI in der Folge von Fukushima angeordnete Nachrüstungen zur Erhöhung der Robustheit des Lagerbeckengebäudes bei Erdbeben sind umgesetzt, so dass sich hieraus kein bewertungsrelevanter Unterschied ergibt.

Die derzeit zur betrieblichen Lagerbeckenkühlung im KKB vorgesehenen Systeme (FAC) stehen bei einem Sicherheitserdbeben oder einem Bemessungshochwasser auslegungsgemäß nicht zur Verfügung. Sie sind nicht als Sicherheitssysteme eingestuft. Durch die Umsetzung des Projekts AUTANOVE ist jedoch eine Verbesserung der Notstromversorgung dieser betrieblichen Beckenkühlsysteme erfolgt. Auch das alternative, Brennelementlagerbeckenkühlsystem (FEC) ist als rein betriebliches Kühlsystem einzustufen. Die Nachrüstung eines als Sicherheitssystem qualifizierten unabhängigen Beckenkühlstrangs, der auch bei Einwirkungen von außen verfügbar bleibt, ist vorgesehen, jedoch noch nicht umgesetzt. Die Umsetzung der Nachrüstung war bis Ende 2014 vorgesehen und ist nun bis Ende 2017 geplant.

Die zur Beherrschung von Ereignissen auf der Sicherheitsebene 3 zur Verfügung stehenden Einrichtungen stellen aus unserer Sicht insbesondere bis zur endgültigen Umsetzung der Nachrüstung eines als Sicherheitssystem qualifizierten Strangs, jedoch auch darüber hinaus, einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Im Rahmen von anlageninternen Notfallmaßnahmen kann in der Anlage KKB sowohl über das alternative Lagerbeckenkühlsystem als auch über eine neue, räumlich getrennte und fest verlegte Anschlussleitung Wasser in das Lagerbecken eingespeist werden. Die vom ENSI geforderte Möglichkeit das verdampfte Beckenwasserinventar aus dem Lagerbeckengebäude über den Fortluftkamin abgegeben zu können, ist allerdings noch in der Umsetzung. Diese noch nicht implementierte Möglichkeit zur Wärmeabfuhr über den Fortluftkamin, stellt aus unserer Sicht bis zur endgültigen Umsetzung der Maßnahmen einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Hinsichtlich einer zusätzlichen Instrumentierung des Lagerbeckens hat die Aufsichtsbehörde bestätigt, dass eine entsprechende Nachrüstung geplant ist. Entgegen der ursprünglichen Zeitplanung wurde diese bis Ende 2014 noch nicht abgeschlossen sondern soll bis Ende 2017 fertiggestellt werden. Die noch nicht implementierte Instrumentierung des Brennelement-Lagerbeckens im Rahmen der Störfallinstrumentierung stellt aus unserer Sicht bis zur endgültigen Umsetzung der Maßnahmen einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Die Lagerbecken sind im KKB in einem separaten Gebäude untergebracht, in den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Druckwasserreaktoren hingegen innerhalb des Containments im Reaktorgebäude. Dies gewährleistet einen zusätzlichen Schutz gegen mechanische Einwirkungen von außen und eine bessere Spaltproduktrückhaltung im Falle von Brennelementschäden. Vor diesem Hintergrund stufen wir die Unterbringung der Lagerbecken außerhalb des Containments in einem eigenen Lagerbeckengebäude weiterhin als sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB ein.

### **Elektrische Energieversorgung**

In der Anlage KKB sind eine Netzanbindung sowie eine Reservenetzanbindung zur elektrischen Energieversorgung des Eigenbedarfssystems vorhanden. Weiterhin ist ein Inselbetrieb der Anlage durch Lastabwurf auf Eigenbedarf grundsätzlich möglich. Allerdings ist durch die externe Netzanbindung sowie im Inselbetrieb keine Versorgung des Notstandschiene möglich, so dass

diese Einspeisemöglichkeiten nur für die (n+1) redundanten Einrichtungen des ursprünglichen Sicherheitssystems verfügbar sind. Auch verfügt die Anlage KKB nicht über einen unabhängigen dritten Netzanschluss.

Mit der Umsetzung der Nachrüstungen im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde die bisherige Notstromversorgung der Anlage KKB durch das Wasserkraftwerk und die Flutdiesel ersetzt. Für jeden Block der Anlage KKB stehen nunmehr zwei Notstromdieselaggregate inklusive Hilfssystemen und zugehöriger Infrastruktur zur Versorgung der zwei ursprünglichen Stränge des Sicherheitssystems zur Verfügung. Zusätzlich zu diesen beiden Notstromdieselaggregaten steht wie bisher die Versorgung des Notstandsystems durch jeweils einen Notstanddiesel pro Block zur Verfügung. Dies entspricht auch ohne die Berücksichtigung von Möglichkeiten der Blockstützung einem blockweisen (n+2) Redundanzgrad in der Notstromversorgung.

Hinsichtlich der vorhandenen Diversität der Notstromerzeugungsanlagen ist die Situation in der Anlage KKB damit vergleichbar zum Sicherheitsstatus der deutschen Anlagen (jeweils Generatoren des Notstrom- und des Notstandsnotstromsystems). Hinsichtlich des verfügbaren Redundanzgrads ist dieser bei Ereignissen, die nur einen Block der Anlage KKB betreffen, mit dem (n+2)-Redundanzgrad der blockeigenen Versorgung bei Kreditierung der zusätzlichen Möglichkeit der redundanten Blockstützung durch den Nachbarblock ebenfalls vergleichbar. Für Ereignisse, die beide Blöcke gleichzeitig betreffen, wäre der verfügbare Redundanzgrad der Notstromerzeugungsanlagen reduziert. Insbesondere bei Bemessungserdbeben stünden pro Block nur noch (n+1) Stränge der Notstrom- und Notstandsnotstromversorgung zur Verfügung.

Auf dieser Basis bewerten wir die Grundausslegung der elektrischen Energieversorgung in KKB als nicht gleichwertig zur Grundausslegung der elektrischen Energieversorgung in den deutschen Anlagen. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Hinsichtlich der für anlageninterne Notfallmaßnahmen auf dem Anlagengelände vorhandenen Einrichtungen sowie innerhalb einer Karenzzeit von wenigen Stunden auf das Anlagengelände transportierbaren Einrichtungen zur Wiederherstellung einer Wechselstromversorgung und zur Durchführung einer autarken Bespeisung des Brennelement-Lagerbeckens bestehen keine bewertungsrelevanten Unterschiede.

Soweit aus den verfügbaren Unterlagen erkennbar erfordert die sekundärseitige Druckentlastung im KKB weiterhin ein Öffnen von Dampferzeugerabblaseventilen über eine Handkurbel. Demgegenüber kann die Öffnung der Abblaseventile in den deutschen Anlagen fernbetätigt erfolgen, solange Batteriestrom zur Verfügung steht. Weiterhin bestehen Unsicherheiten bezüglich des Nachweises der Wirksamkeit der vorgesehenen Maßnahmen zur Dampferzeugerbespeisung mit mobilen Feuerlöschpumpen für die Vor-Ort-Situation im KKB. Dies stufen wir als einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB ein.

## **Kühlwasser**

Das Nebenkühlwassersystem des KKB mit Wärmeabfuhr an die Aare weist keine durchgehende räumliche Trennung auf und steht bei verschiedenen EVI und EVA Ereignissen nicht uneingeschränkt gesichert zur Verfügung. Bei Verlust des primären und sekundären Nebenkühlwassers aufgrund einer externen Überflutung des Anlagengeländes kann über Handmaßnahmen eine Versorgung des sekundären Nebenkühlwassersystems durch den Notbrunnen aufgebaut werden, so dass die sekundärseitige Bespeisung der Dampferzeuger aufrechterhalten werden kann. Durch die Nachrüstungen im Rahmen des Projekts AUTANOVE ist auch im Erdbebenfall eine weitere Bespeisung eines Strangs des Notspeisesystems aus dem Notbrunnen und damit die sekundärseitige Wärmeabfuhr über diesen Strang gesichert. Die

Kühlung des Brennelement-Lagerbeckens mit dem betrieblichen oder dem alternativen Beckenkühlsystem ist bei unverfügbarem Nebenkühlwasser nicht möglich.

Die Einschränkungen in der ereignisspezifischen Verfügbarkeit der Nebenkühlwasserversorgung stellt aus unserer Sicht insbesondere für die Stillstandsphase bei unverfügbaren Dampferzeugern und mit Blick auf die Lagerbeckenkühlung einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Das KKB verfügt mit der Aare und dem aus den Brunnen geförderten Grundwasser über diversitäre Wärmesenken. Die Abfuhr der Nachzerfallswärme und die Komponentenkühlung können mittels Brunnenwasser erfolgen. Bei verfügbaren Dampferzeugern stehen dafür zwei Brunnen (Notbrunnen, Notstand-Brunnen) mit den jeweils davon versorgten verfahrenstechnischen Systemen zur Verfügung. Bei unverfügbaren Dampferzeugern steht nur der Notstand-Brunnen mit den davon versorgten verfahrenstechnischen Systemen zur Verfügung, da vom Notbrunnen nur Systeme zur Dampferzeugerbespeisung versorgt werden. Eine Kühlung des Brennelement-Lagerbeckens über eine diversitäre Wärmesenke wird erst nach Abschluss der Nachrüstung des als Sicherheitssystem qualifizierten unabhängigen Beckenkühlstrangs möglich sein. Hinsichtlich der grundsätzlichen Verfügbarkeit einer diversitären Wärmesenke ergibt sich kein bewertungsrelevanter Unterschied.

Grundsätzlich steht die diversitäre Wärmesenke in der Anlage KKB mit dem Notbrunnen und dem Notstandbrunnen über zwei verfahrenstechnisch unabhängige Systeme zur Verfügung. Ereignisabhängig stehen diese jedoch nur eingeschränkt zur Verfügung. Allerdings verbleibt in diesen Fällen in der Anlage KKB auch noch die Möglichkeit zum Aufbau einer Nebenkühlwasserversorgung im Rahmen von anlageninternen Notfallmaßnahmen. Diesbezüglich geht die Auslegung des KKB über diejenige einzelner noch im Leistungsbetrieb befindlicher deutscher DWR Anlagen hinaus, was wir als sicherheitstechnischen Vorteil einstufen.

### **Extreme Wetterbedingungen**

Die gemäß schweizerischem Regelwerk sowie aus Auflagen des ENSI resultierenden Anforderungen an die Gefährdungsanalysen der Anlage KKB zu extremen Wetterbedingungen entsprechen dem grundsätzlichen Anforderungsniveau und dem Ereignisspektrum, wie es durch internationale Anforderungen (IAEA, WENRA) oder auch in Empfehlungen der RSK in Deutschland gefordert wurde. Sowohl die zu berücksichtigende Häufigkeit von Einwirkungen als auch eine Analyse von möglichen Kombinationen kausal bedingter oder unabhängiger Ereignisse entsprechen dabei grundsätzlich dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

Für die schweizerischen Anlagen wurde vom ENSI festgestellt, dass vielfach die zu unterstellenden Einwirkungen nicht quantitativ bestimmt wurden, sondern ein qualitativer Nachweis einer ausreichenden Robustheit der Anlage vom Betreiber zu führen ist. Auch dies entspricht grundsätzlich internationalen Empfehlungen und der für deutsche Anlagen geforderten Vorgehensweise.

Für die Anlage KKB wurde von ENSI bestätigt, dass die zu unterstellenden extremen Wetterbedingungen einzelfehlersicher beherrscht werden können, wobei vor allem die Notstandssysteme darüber hinaus eine hohe Robustheit ausweisen. Dies ist mit dem Sicherheitsstatus der deutschen Anlagen grundsätzlich vergleichbar. Für die deutschen Anlagen ergibt sich dabei insbesondere aufgrund des abdeckenden Charakters von anderen Anforderungen zum Schutz vor Einwirkungen von außen (Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle) eine hohe Robustheit der für vitale Sicherheitsfunktionen erforderlichen Einrichtungen.

Spezifisch mit Blick auf die Einwirkungen durch Wind bzw. Tornado sind für die Anlage KKB Windgeschwindigkeiten von 60 m/s zu unterstellen. Inwieweit die Festlegung einer solchen maximalen zu berücksichtigenden Windgeschwindigkeit sowohl das erforderliche Bemessungsereignis, als auch eine im Sinne der Robustheit über diese Einwirkung hinausgehende Einwirkung zur Ermittlung von Sicherheitsreserven abdeckt ist offen.

Bezüglich des Schutzes gegenüber Blitzeinwirkungen hat die deutsche RSK neue Anforderungen aufgestellt, die sowohl eine Einhaltung des im Rahmen der Auslegung erforderlichen Schutzes der Anlagen als auch eine darüber hinausgehende Robustheit für auslegungsüberschreitende Blitzeinwirkungen sicherstellen soll. Diese Empfehlung stellt hinsichtlich der zu berücksichtigenden Blitzstromsteilheit höhere Anforderungen, als diese bislang gemäß schweizerischem Regelwerk gefordert werden.

### **Reaktordruckbehälter**

Der Reaktordruckbehälter (RDB) ist die sicherheitstechnisch wichtigste Komponente im Kernkraftwerk, die nicht austauschbar ist. Sein Versagen muss ausgeschlossen werden, da es nicht beherrscht wird. Dies begründet die besondere Bedeutung der Qualität bei der Herstellung des RDBs, die auch eine wesentliche Voraussetzung zur Vermeidung von Unsicherheiten bei der Nachweisführung zum RDB darstellt.

Beide Reaktordruckbehälter der Anlage KKB weisen bereits eine im internationalen Vergleich sehr hohe Versprödung auf. Der von den anderen drei kernnahen Ringen auffallend hoch abweichende Versprödungszustand des Rings C in Block 1 von KKB ist vermutlich vorwiegend auf eine besonders ungünstige Materialzusammensetzung bzw. Probleme beim Guß oder bei der Wärmebehandlung zurückzuführen.

Diese Sachverhalte weisen auf ungünstige Herstellungsbedingungen und vergleichsweise ungünstige Materialzusammensetzungen der RDBs, insbesondere bei Ring C von Block 1, hin und stellen somit einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Auf Basis von Materialprobensätzen wird die Prognose für den Langzeitsicherheitsnachweis des RDBs abgegeben. Die Auswertungen des letzten, 2010 in KKB 1 aus dem Reaktordruckbehälter entnommenen Materialprobensatzes T zeigen eine unerwartet hohe Versprödungszunahme, die von den bis dahin vorgenommenen Prognosen des Versprödungsverlaufs nicht abgedeckt wird. Eine seitens ENSI von Axpo geforderte Erklärung hierfür liegt uns nicht vor. Es sollte begründet dargelegt werden, dass sich hieraus keine Hinweise auf einen Cliff-Edge-Effekt herleiten lassen.

Angesichts der geringen verbleibenden Sicherheitsmargen insbesondere für Ring C des Blocks 1 sollte für die Anwendung der Methoden II, A und B nach dem Master-Curve Verfahren plausibel und nachvollziehbar detailliert dargelegt werden, unter welchen Randbedingungen das Master-Curve-Verfahren angewendet wurde, welche Materialbeprobungen (Anzahl, Größe und Behandlungshistorie) durchgeführt wurden und unter welchen Voraussetzungen welche Sicherheitsmargen festgestellt wurden.

Im Rahmen der Bestimmung der Sprödbbruchreferenztemperatur wurden bereits zahlreiche, in den klassischen Verfahren enthaltene Konservativitäten abgebaut, die zusätzliche Sicherheitsmargen gewährleisten würden. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Die im Juli 2015 entdeckten Befunde verschärfen das Nachweisproblem zur Sprödbrechtsicherheit des RDBs erheblich. Es ist ein neuer Strukturintegritätsnachweis zu führen, der berücksichtigt, dass im kernnahen Ring C sowie im Stutzenring des Reaktordruckbehälters von Beznau 1

Inhomogenitäten vorliegen. Da der Nachweis mit der konservativsten Methode I zur Ermittlung der Sprödbruchreferenztemperatur bereits vor den Befunden nicht mehr geführt werden konnte, kann er nunmehr nur noch nach dem Master-Curve Verfahren Methode II geführt werden. Hierbei sind vielfache methodische Randbedingungen zu berücksichtigen bzw. einzuhalten.

Die in den RDBs der Anlage Beznau vorgefundenen Anzeigen stellen weitere Hinweise auf Mängel in der Herstellungsqualität der RDBs und damit einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar. Der Sicherheitsnachweis für die Integrität des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 lässt sich vor diesem Hintergrund, wenn überhaupt, nur noch mit erheblich reduzierten Sicherheitsmargen führen.

### **Weitere sicherheitsrelevante Schwachstellen**

Hinsichtlich der Vermaschung der Redundanzen und damit auch der Beherrschbarkeit eines passiven Einzelfehlers ist der pro Block nur einmal vorhandene Borwasservorratstank (BOTA) von besonderer Relevanz. Eine Unverfügbarkeit des BOTA würde im KKB zu einem Verlust des Wasserinventars führen, das für die Sperrwasserversorgung der Reaktorhauptpumpen, die Ergänzung von Kühlmittelverlusten oder die Einstellung des Rezirkulationsbetriebs erforderlich ist. Auch wenn im Rahmen der formalen Nachweisführung kein Einzelfehler in den passiven Komponenten unterstellt werden muss, stellt die Abhängigkeit wichtiger Sicherheitsfunktionen von einem pro Block nur einfach vorhandenen Vorratsbehälter einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Die RSK hat allen deutschen Anlagen mit der Genehmigung zum Leistungsbetrieb hinsichtlich der Robustheit gegenüber zivilisatorischen Einwirkungen von außen mit Blick auf einen Flugzeugabsturz die Einhaltung des Schutzgrads 2 bei der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinien bestätigt, hinsichtlich der Einhaltung des Schutzgrads 2 für eine Last-Zeit-Funktion eines mittleren Verkehrsflugzeuges gab es auf Basis generischer Untersuchungen zu Druckwasserreaktoren keine Hinweise, das vitale Funktionen nicht erhalten bleiben. Eine Bestätigung des Schutzgrads 2 für mittlere Verkehrsflugzeuge setzte jedoch weitere Nachweise voraus. Weiterhin hat die RSK allen Anlagen die Einhaltung des Schutzgrades 1 mit Blick auf die Einwirkungen einer Explosionsdruckwelle bestätigt.

Angesichts der Auslegungsmerkmale der Anlage KKB gehen wir von einer gegenüber diesem Sicherheitsstatus geringeren Robustheit gegenüber zivilisatorischen Einwirkungen aus. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.



## 1. Einleitung und Zielsetzung

Als eine Konsequenz aus der Reaktorkatastrophe am 11. März 2011 in der japanischen Anlage Fukushima Daiichi sind auf verschiedenen nationalen und internationalen Ebenen Überprüfungsprozesse in Gang gesetzt worden. Schwerpunkt der anlagenspezifischen Überprüfungen war eine Analyse ausgewählter Sicherheitsaspekte unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus dem Unfallablauf in Fukushima, auch unter Annahmen, die über die bisherigen Auslegungsgrenzen der Anlagen hinausgehen. Auf europäischer Ebene wurde hierzu der sogenannte EU-Stresstest durchgeführt.

Für Baden-Württemberg sind grenznahe Anlagen von besonderer Bedeutung. In der Schweiz zählen hierzu die schweizerischen Druckwasserreaktoren Beznau I und II (Inbetriebnahme 1969 bzw. 1971), die zu den ältesten Anlagen weltweit gehören. Das Land Baden-Württemberg kann bei schweren Unfällen in den genannten Kernkraftwerken betroffen sein.

Das Öko-Institut hat im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Oktober 2012 ein Gutachten vorgelegt (Brettner et al. 2012), in dem Aussagen zu bislang im Rahmen des EU-Stresstests noch fehlenden oder unzureichend betrachteten Sicherheitsaspekten abgeleitet wurden. Weiterhin wurde anlagenspezifisch Hinweisen auf sicherheitstechnische Schwachstellen nachgegangen. Die Ergebnisse wurden dort anhand der Themenfelder Erdbeben, Überflutung, Brennelement-Lagerbecken, elektrische Energieversorgung und Kühlwasser sowie weiterer sicherheitsrelevanter Schwachstellen dargestellt. Eine vollumfängliche Überprüfung des Sicherheitsstatus der Anlagen lag außerhalb des Bearbeitungsumfanges dieses Gutachtens und wäre auf Basis der im Rahmen des EU-Stresstests vorliegenden Unterlagen auch nicht möglich.

Der Betreiber der Anlage Beznau (Axpo) sowie die schweizerische Aufsichtsbehörde Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) haben unter anderem mit (Karrer 2012) sowie mit (ENSI 2013a; ENSI & TFK 2014b) zur Analyse des Öko-Instituts Stellung genommen.

Weiterhin wurden in Reaktion auf die Ergebnisse des EU-Stresstests (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) von der Aufsichtsbehörde verschiedene Auflagen und Nachrüstungen für die Anlage Beznau beschlossen, die im Gutachten des Öko-Instituts von 2012 noch nicht vollständig berücksichtigt werden konnten, beziehungsweise deren Umsetzungsstand sich zwischenzeitlich verändert hat.

Ziel dieses Gutachtens ist eine Aktualisierung der Bewertungen der sicherheitstechnischen Schwachstellen der Anlage Beznau unter Berücksichtigung der seit Abschluss des EU-Stresstests geplanten bzw. bereits erfolgten sicherheitstechnisch relevanten Nachrüstungen.

Dazu wird für die oben genannten Themenfelder zunächst analysiert, ob sich bezüglich des in (Brettner et al. 2012) dargestellten Sachstands zur Sicherheit des Kernkraftwerks Beznau abweichende bzw. neue Erkenntnisse aus den Darlegungen des Betreibers bzw. der Aufsichtsbehörde ergeben.

Weiterhin wird geprüft, welche Bedeutung die zwischenzeitlich beschlossenen Auflagen bzw. Nachrüstungen hinsichtlich der in (Brettner et al. 2012) identifizierten Schwachstellen aufweisen und wie sich deren Umsetzungsstand bzw. der zugrundeliegende Zeitplan für die Anlage Beznau darstellt, soweit hierzu öffentlich verfügbare Informationen vorliegen. Dabei wurden die bis Anfang 2017 veröffentlichten Informationen ausgewertet.

Als Basis für die Bewertung wurde in (Brettner et al. 2012) der Sicherheitsstatus der noch in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke herangezogen, wie er sich auf Basis der Ergebnisse der Sicherheitsüberprüfung der RSK darstellte.

Eine detaillierte Wiedergabe des Umfangs der erfolgten nationalen und internationalen Überprüfungsprozesse, des daraus abgeleiteten Bewertungsmaßstabs sowie der wesentlichen sicherheitstechnisch relevanten Einrichtungen der deutschen Anlagen sowie der Anlage Beznau erfolgt im Rahmen dieses Gutachtens nicht, hierzu wird auf die Darstellungen in (Brettner et al. 2012) verwiesen.

Gemäß (Brettner et al. 2012) ist dabei für eine Bewertung des Sicherheitsstatus zunächst eine Berücksichtigung der Grundausslegung der Anlage erforderlich. Die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) hat in ihrer Sicherheitsüberprüfung für alle deutschen Kernkraftwerke einen „Basislevel“ als Mindestanforderung an die Grundausslegung definiert, dessen Einhaltung für alle Anlagen von der RSK vorausgesetzt wurde und der daher als Mindestanforderung an die Anlagenauslegung aus deutscher Sicht herangezogen werden konnte.

Darüber hinaus wurden themenspezifisch unterschiedliche Reserven ausgewiesen. Auch für diese ist zur Bewertung des Sicherheitsstatus ein gemeinsamer Bewertungsmaßstab notwendig. Hierfür wurden die im Rahmen der RSK-Sicherheitsüberprüfung definierten Robustheitslevel herangezogen. Davon ausgehend wurde geprüft, inwieweit dieser Sicherheitsstatus von der Anlage Beznau erreicht oder gar übertroffen wird.

Schließlich wurden auch die in Folge der nationalen und internationalen Überprüfungen geplanten Verbesserungsmaßnahmen in den Anlagen betrachtet und die damit erreichbare Erhöhung der Robustheit der Anlage bewertet.

Dieser Bewertungsmaßstab wird auch im Rahmen des hier vorgelegten Gutachtens zugrunde gelegt. Eine detaillierte Darstellung des Sicherheitsstatus der deutschen Anlagen sowie der erweiterten Anforderungen in Deutschland in Reaktion auf Fukushima ist den Kapiteln 3.1 und 3.2 in (Brettner et al. 2012) zu entnehmen. Im Rahmen des hiermit vorgelegten Gutachtens wird dieser Bewertungsmaßstab hinsichtlich des in Deutschland gültigen Sicherheitsstatus gemäß der zusätzlichen Anforderungen aktualisiert, wie sie beispielsweise im Rahmen des deutschen nationalen Aktionsplans formuliert wurden. Dazu wird im Rahmen der Stellungnahme zu den jeweiligen Themenfeldern auf die Weiterentwicklung des Sicherheitsstatus in Deutschland eingegangen. Auf dieser Basis erfolgt eine aktualisierte Bewertung, wobei für die Anlage Beznau jeweils vorhandene Vor- oder Nachteile gegenüber dem somit definierten Sicherheitsstatus ausgewiesen werden.

Zu Beginn der jeweiligen Themenfelder werden die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Neben den bereits in (Brettner et al. 2012) ausführlicher behandelten Themenfeldern hat die Aufsichtsbehörde ENSI in der Schweiz das Themenfeld „Extreme Wetterbedingungen“, das bereits im EU-Stresstest 2011 behandelt wurde, als ein Schwerpunktthema behandelt (ENSI 2012c). Weiterhin spielt die altersbedingte Versprödung des Reaktor Druckbehälters (RDB) im Zusammenhang mit im RDB der Anlage Beznau vorgefundenen Anzeigen eine wichtige Rolle bei der Frage des Sicherheitsstatus der Anlage Beznau. Daher werden diese Themenfelder im Rahmen des hier vorgelegten Gutachtens gesondert behandelt.

Neben den im Rahmen dieses Gutachtens behandelten Themenfeldern wurden sowohl in Deutschland wie in der Schweiz eine Anzahl weitere, mit dem Unfall in Fukushima sowie mit den

Ergebnissen des EU-Stresstests in Zusammenhang stehende Themenfelder intensiv diskutiert (so beispielsweise Fragen der Sicherheitskultur, der Struktur der Aufsichtsbehörden oder des anlageninternen und -externen Notfallschutzes). Hieraus könnten sich weitere relevante Unterschiede im Sicherheitsstatus der Anlage Beznau. Es soll daher an dieser Stelle nochmals explizit darauf hingewiesen werden, dass es sich trotz des gegenüber der Untersuchung im Jahr 2012 teilweise erweiterten Betrachtungsumfangs bei diesem Gutachten nicht um eine vollumfängliche Überprüfung des Sicherheitsstatus der Anlagen handelt.



## 2. Grundsätze des Auslegungskonzepts

Die Anlage Beznau unterscheidet sich in ihrem grundsätzlichen Auslegungskonzept von den in Deutschland aktuell noch betriebenen Druckwasserreaktoren. Diese Auslegungsunterschiede betreffen schwerpunktmäßig die Situation bei naturbedingten Einwirkungen von außen (Erdbeben, Hochwasser, Extreme Wetterbedingungen) und sind daher von besonderer Bedeutung. Die in (Brettner et al. 2012) diesbezüglich identifizierten Schwachstellen, welche von übergeordneter Bedeutung für verschiedene der betrachteten Themenfelder sind, werden daher in Kap. 2.1 vorab übergeordnet dargestellt. Daran anschließend werden in Kap. 2.2 Erkenntnisse aus den Darstellungen des Betreibers sowie in Kap. 2.3 aus denen der Aufsichtsbehörde mit Bezug zu diesen Schwachstellen übergeordnet dargestellt.

Darüber hinaus hat die Aufsichtsbehörde verschiedene Nachrüstungen angeordnet. Da auch die in diesem Rahmen geplanten bzw. nachgerüsteten Einrichtungen ereignisübergreifend von Bedeutung sein können, werden auch diese in Kap. 2.4 übergeordnet dargestellt. Die Aussagen von Betreiber und Aufsichtsbehörde sowie die Bedeutung der vorgesehenen oder bereits durchgeführten Nachrüstungen werden übergeordnet in Kap. 2.5 bewertet, in den jeweiligen Themenfeldern wird dann noch auf die jeweilige spezifische Bedeutung eingegangen.

### 2.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Für die Beherrschung des der Auslegung der Anlage zugrunde gelegten Erdbebens stehen in deutschen KKW mit dem Notspeisesystem, dem Not- und Nachkühlsystem sowie den zugehörigen Hilfssystemen zur elektrischen Energieversorgung Sicherheitssysteme zur Verfügung. Diese gewährleisten auch bei einem unterstellten Ausfall eines Stranges aufgrund eines Einzelfehlers in Kombination mit der Unverfügbarkeit eines weiteren Stranges infolge einer Instandsetzung die Nachwärmeabfuhr, d. h. von den jeweils vorhandenen vier Strängen sind zwei Stränge auslegungsgemäß für die Beherrschung des Ereignisses ausreichend (n+2 Redundanzgrad).

Zur Beherrschung des Sicherheitserdbebens (SSE) ist im KKB gegenwärtig auslegungsgemäß das Notstandssystem vorgesehen. Dies führt dazu, dass im Vergleich zu den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen eine geringere Zahl von Redundanten zur Ereignisbeherrschung zur Verfügung steht. Insbesondere führt die Überlagerung von Einzelfehler und Instandhaltungsfall an bestimmten gleichartigen aktiven Komponenten der Notstandssysteme (Notstromdieselaggregate, Brunnenwasserpumpen) zum blockübergreifenden Ausfall der entsprechenden Funktion und würde somit auslegungsgemäß nicht beherrscht.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Leistungsbetrieb stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand im Falle eines SSE auslegungsgemäß zwei Pfade zur Verfügung, die z. T. gemeinsame Komponenten nutzen. Einer der beiden Pfade erfordert Maßnahmen, die in Deutschland als Notfallmaßnahmen eingestuft würden (primärseitiges Bleed-and-Feed). Die Einrichtungen des anderen Pfades (u. a. das Notstand-Speisewassersystem zur Dampferzeugerbespeisung) weisen einen Redundanzgrad von (n+0) mit einer Kapazität von 1 x 100% auf.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand im Falle eines SSE auslegungsgemäß zwei Pfade zur Verfügung, die z.T. gemeinsame Komponenten nutzen. Mit beiden Pfaden ist ein Wassereintrag in das Primärcontainment verbunden, bei geschlossenem PKL ist eine Öffnung desselben zur Dampf- und Wasserabgabe in das Containment erforderlich. Diese Fahrweisen würden in

Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft, da die Nachkühlketten gegen Erdbeben ausgelegt sind und somit keine Erfordernis für eine derartige Fahrweise besteht.

Eine Erhöhung der Zahl der nach einem SSE im KKB zur Nachwärmeabfuhr über die Dampferzeuger verfügbaren Stränge ergibt sich nach Realisierung des Projekts AUTANOVE. Hierdurch wird zusätzlich zum Notstandsystem ein weiterer erdbebensicherer Strang unter Nutzung des Notspeisewassersystems zur Verfügung stehen. Eine blockweise Beherrschung von Einzelfehler und Instandhaltungsfall – wie in den deutschen Anlagen – ergibt sich allerdings auch daraus noch nicht.

In den deutschen Anlagen sind die zur Nachwärmeabfuhr vorgesehenen Systeme (Notspeisesystem, Nachkühlsystem) vollumfänglich in einem Redundanzgrad von (n+2) ausgeführt.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Leistungsbetrieb stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand im Falle einer Überflutung vier Stränge zur Verfügung. Einer der vier Pfade erfordert Maßnahmen, die in Deutschland als Notfallmaßnahmen eingestuft würden, alle vier Pfade sind von einem nur einfach vorhandenen Vorratsbehälter (BOTA) abhängig.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern stehen demgegenüber auslegungsgemäß nur zwei Pfade unter Nutzung des Notstandsystems zur Verfügung. Diese Pfade nutzen z. T. gemeinsame Komponenten. Mit beiden Pfaden ist ein Wassereintrag in das Primärcontainment verbunden, bei geschlossenem Primärkreislauf ist eine Öffnung desselben zur Dampf- und Wasserabgabe in das Containment erforderlich. Diese Fahrweisen würden in Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft, da die Nachkühlketten gegen Überflutung ausgelegt sind und somit keine Erfordernis für derartige Fahrweisen besteht.

Eine Erhöhung der Zahl der bei einer externen Überflutung zur Nachwärmeabfuhr über die Dampferzeuger verfügbaren Stränge ergibt sich nach Realisierung des Projekts AUTANOVE, da dann ein weiterer flutsicherer Strang zur Nachwärmeabfuhr installiert sein wird.

Die Grundauslegung deutscher Anlagen umfasst ein Nebenkühlwassersystem mit einem (n+2) Redundanzgrad, das auch bei Einwirkungen von außen wie Erdbeben und Hochwasser verfügbar ist.

Das Nebenkühlwassersystem des KKB mit Wärmeabfuhr an die Aare weist keine durchgehende räumliche Trennung auf und steht bei EVA Ereignissen (Erdbeben, externe Überflutung) nicht gesichert zur Verfügung.

Hinsichtlich der Bewertung der (Not-)Stromversorgung der verschiedenen Systeme wird an dieser Stelle auf die ausführlicheren Ausführungen in Kapitel 6 verwiesen.

## 2.2. Darlegungen des Betreibers

Mit dem Schreiben (Karrer 2012) nimmt der Betreiber des Kernkraftwerks Beznau in knapper Form zum Gutachten des Öko-Instituts von 2012 (Brettner et al. 2012) Stellung. Er verweist darauf, dass wichtige Sicherheitssysteme in der Studie nicht berücksichtigt seien und nennt als Beispiel dafür die Diversität der Kühlmöglichkeiten. Weiterhin spiegeln die Angaben zu den blockübergreifenden Versorgungsmöglichkeiten der Notstandssysteme nicht die Gegebenheiten in Beznau wieder. Genauere Ausführungen hierzu enthält das Schreiben jedoch nicht.

In (Richner 2016) werden wesentliche Nachrüstungen an der Anlage Beznau in Reaktion auf die Unfälle in Tschernobyl und Fukushima dargestellt. Als wesentliche Nachrüstungen in der Vergangenheit werden dabei benannt:

- Nachrüstung eines Notstandssystems: räumlich getrenntes, gebunkertes Gebäude mit Einrichtungen zur Ergänzung eines dritten, diversitären Strangs für alle relevanten Sicherheitsfunktionen gegenüber der ursprünglich zweisträngigen Auslegung.
- Nachrüstung eines Strangs der Notspeisewasserversorgung
- Erweiterung der Notstromversorgung durch das Wasserkraftwerk Beznau von ursprünglich einem auf zwei unabhängige Stränge
- Nachrüstung eines gefilterten Containment-Druckentlastungssystems sowie von autokatalytischen Wasserstoff-Rekombinatoren im Containment
- Nachrüstung eines alternativen Kühlsystems des Brennelementlagerbeckens
- Austausch vorhandener Einrichtungen durch neue, u. a. des Borwassertanks samt Gebäude, wichtiger Ventile sowie leittechnischer Einrichtungen.

Gemäß (Richner 2016) wurde in der Revision 2015 im Rahmen des Projekts AUTANOVE die bisherige Notstromversorgung aus dem Wasserkraftwerk Beznau sowie von zwei 380-V-Flutdieseln durch zwei neue, seismisch qualifizierte Notstromdiesgeneratoren pro Block ersetzt. Des Weiteren erfolgte die Installation einer Grundwasser- und einer Sperrwasserpumpe zum Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren Strangs der Kernkühlung. Schließlich umfassen die Nachrüstungen dieser Revision den Aufbau eines erdbebensicheren, aus dem Notstandsystem versorgten Kühlsystems für das Brennelementlagerbecken.

Durch diese Nachrüstungen sei die probabilistisch bestimmte Kernschadenshäufigkeit der Anlage von etwas über  $10^{-3}$  pro Jahr im Jahr 1986 auf knapp unter  $10^{-5}$  pro Jahr im Jahr 2000 zurückgegangen.

Hinsichtlich der Sicherheitseinrichtungen des KKB unterscheidet (Richner 2016) auch zwischen den zur Beherrschung von Störfällen vorgesehenen Sicherheitseinrichtungen, die der Sicherheitsebene 3 zuzuordnen sind, und den zum Unfallmanagement zählenden anlageninternen Notfallmaßnahmen der Sicherheitsebene 4. Demnach setze das Unfallmanagement auf der Sicherheitsebene 4 eine robuste Auslegung der Sicherheitssysteme auf der Sicherheitsebene 3 voraus und dürfe nicht als Ersatz oder Kompensation von Schwachstellen auf der Sicherheitsebene 3 verstanden werden. Zu den technischen Einrichtungen zur Kernkühlung, die im Rahmen des Unfallmanagements (also auf Sicherheitsebene 4) eingesetzt werden könnten, gehören demnach

- Einrichtungen zur Notborierung (bei ATWS-Ereignissen),
- das Notstandssystem (beim Totalausfall des Notspeisewassers oder dem Ausfall des Notstroms),
- primärseitiges und sekundärseitiges „Bleed and Feed“ (Druckentlastung und Bespeisung, auf der Sekundärseite unter Verwendung von Feuerlöschpumpen),
- unter Druck stehende Wasserquellen,
- mobile Dieselgeneratoren sowie
- mobile Steuerluftkompressoren.

Schließlich sind nach (Richner 2016) auf der Sicherheitsebene 4b im KKB auch anlagenspezifisch die Severe Accident Management Guidelines (SAMGs) der Westinghouse Owners Group, die auch als Unfallbegrenzungs-Richtlinien bezeichnet werden, eingeführt.

Hinsichtlich der dafür speziell auf Sicherheitsebene 4b einsetzbaren Einrichtungen seien bezüglich Wasserstoff aus der Zirkon-Oxidation der Brennelemente und der Kernschmelze-Beton-Wechselwirkung die passiven Wasserstoff-Rekombinatoren bedingt wirksam, weiterhin komme der Containment-Druckfestigkeit besondere Bedeutung zu. Hinsichtlich einer möglichen Dampfexplosion im RDB oder im Containment seien keine spezifischen Maßnahmen vorhanden, vielmehr sei aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit eines derartigen Ereignisses die Containment-Druckfestigkeit ausreichend. Einem langfristigen Druckanstieg im Containment werde durch Sprühen ins Containment beispielsweise über Feuerwehropumpen, die Containment-Umluftkühlung sowie die gefilterte Druckentlastung begegnet. Ansonsten werden über die bereits auf Sicherheitsebene 4a Verwendung findenden Einrichtungen (sowie alle verfügbaren Einrichtungen der Sicherheitsebenen 1-3) hinaus keine weiteren spezifischen Einrichtungen für die Sicherheitsebene 4b benannt.

Bezüglich der Verfügbarkeit von mobilen Einrichtungen (Dieselgeneratoren, Feuerwehropumpen, Steuerluftkompressoren etc.) verweist (Richner 2016) insbesondere auf das für die schweizerischen Anlagen gemeinsam verfügbare externe Lager Reitnau, welches in Reaktion auf eine Forderung des ENSI nach Fukushima eingerichtet wurde. Mobile Einrichtungen aus dem Lager Reitnau seien in 6 bis 10 Stunden auf den Anlagen verfügbar. Zur Überbrückung dieses Zeitraums mit auf der Anlage vorhanden (mobilen) Einrichtungen sei in Beznau auch das interne Lager ertüchtigt worden. Das externe Lager Reitnau stelle daher eine Redundanz dar bzw. würde für den mittel- und langfristigen Ersatz von Betriebsstoffen benötigt. Die mobilen Einrichtungen werden im Rahmen spezieller Accident-Management-Vorschriften (AM-Vorschriften) im KKB eingesetzt.

Weiterhin seien mobile Anschlusspunkte für die Einspeisung mit Feuerwehropumpen in verschiedene Systeme in der Anlage KKB vorhanden. Durch einen zusätzlichen Anschluss an den Notspeisewassertanks sei damit auch eine Dampferzeugerbespeisung mit mobilen Pumpen (sekundärseitiges „Bleed and Feed“) möglich.

Hinsichtlich einer elektrischen Versorgung von Einrichtungen mit mobilen Generatoren seien Einspeisestellen in das Notstandsystem und in einzelne Nicht-Notstandsystem-Schienen vorhanden.

### 2.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

Das ENSI hat in (ENSI 2013a) eine knappe Bewertung des Gutachtens des Öko-Instituts von 2012 (Brettner et al. 2012) vorgelegt, vergleichbare Argumente wurden auch in (ENSI & TFK 2014b) vorgebracht. Dabei stellt das ENSI zunächst fest, dass die technischen Merkmale der fest installierten Sicherheitssysteme der Anlage Beznau überwiegend richtig dargestellt seien. Weiterhin bestätigt es, dass die vorgenommene Bewertung auf Basis des in (Brettner et al. 2012) definierten Bewertungsmaßstabs im Wesentlichen korrekt sei.

Die Aufsichtsbehörde benennt zwei Punkte der Vorgehensweise in (Brettner et al. 2012), die aus ihrer Sicht zu kritisieren seien.

So sei als erster wesentlicher Kritikpunkt zu bemängeln, dass die fehlende Erfüllung des (deutschen) Instandhaltungskriteriums durch die Anlage Beznau als sicherheitstechnischer Nachteil gewertet worden sei. Da gemäß schweizerischem Regelwerk eine Instandhaltung

während des Betriebs nicht zulässig sei, wenn das Instandhaltungskriterium nicht erfüllt ist, müsse die Instandhaltung in den Störfallanalysen auch nicht berücksichtigt werden.

Gemäß (ENSI 2016b) gilt für die schweizerischen Kernkraftwerke, dass

- für Mehrblockanlagen die Schutzzielfunktionen für jeden einzelnen Kernkraftwerksblock soweit möglich und angemessen unabhängig von denjenigen der anderen Kraftwerksblöcke sein müssen; sofern mechanische oder elektrische Komponenten von Funktionen auf der Sicherheitsebene 3 von mehreren Blöcken gemeinsam genutzt werden, ist dies zu begründen und sicherheitstechnisch zu bewerten.
- Funktionen auf der Sicherheitsebene 3 auch bei einem beliebigen vom auslösenden Ereignis unabhängigen Einzelfehler wirksam bleiben müssen. Das Einzelfehlerkriterium gilt im Leistungsbetrieb auch dann, wenn ein Strang von Sicherheits- oder Notstandssystemen wegen Wartung oder Prüfung nicht verfügbar ist. Abweichungen sind zu begründen und sicherheitstechnisch zu bewerten.

Gemäß (ENSI & TFK 2014b) sind bei laufenden Kernkraftwerken jedoch gegenüber den Anforderungen, die an neue Kernkraftwerke gestellt würden, auch Abweichungen in verschiedenen Bereichen zulässig. So stellt das ENSI fest, dass trotz der zur Kompensation ursprünglicher Auslegungsschwächen durchgeführten Ertüchtigungs- und Ersatzmaßnahmen ein 40-jähriges Kernkraftwerk nicht über alle Auslegungsmerkmale eines Kernkraftwerks der neuesten Generation verfügt. Die Unterschiede betreffen typischerweise:

- den Redundanzgrad, die funktionale Unabhängigkeit und räumliche Trennung von Sicherheitssträngen;
- den Automatisierungsgrad der Sicherheitssysteme;
- die Erdbeben- und Flugzeugabsturzicherheit; sowie
- die Vorsorge gegen auslegungsüberschreitende Störfälle.

Auch bei den rechnerischen Sicherheitsnachweisen werden Abweichungen zu den Anforderungen an Neuanlagen zugelassen. So wird in Einzelfällen eine Nachweisführung mit realistischen statt konservativen Anfangs- und Randbedingungen akzeptiert. Auch Handeingriffe von Operateuren innerhalb der ersten dreißig Minuten dürfen in Einzelfällen unterstellt werden.

Bei der Beurteilung dieser konzeptionellen Alterung richtet sich das ENSI grundsätzlich an den Anforderungen für Neuanlagen aus. Die Bewertung der Umsetzung der nuklearen Auslegungsgrundsätze (Konservativität, Redundanz, Diversität, funktionale und räumliche Trennung) erfolgt jedoch pragmatisch im Hinblick auf die Angemessenheit einer allfälligen Maßnahme. Dabei geht das ENSI in zwei Schritten vor. In einem ersten Schritt wird überprüft, ob die in der Gesetzgebung konkretisierten Anforderungen an ein neues KKW erfüllt sind. Falls dies nicht der Fall ist, wird im zweiten Schritt überprüft, ob die Nachrüstungen umgesetzt wurden, die in mehreren westlichen Ländern in KKW gleichen Typs durchgeführt wurden. Falls es hier Defizite geben sollte, werden entsprechende Nachrüstungen gefordert. Inwieweit die verbleibenden Unterschiede zu den Anforderungen an ein neues Kernkraftwerk vertretbar sind, wird aufgrund der Ergebnisse der probabilistischen Sicherheitsanalyse beurteilt.

Nach (ENSI 2016i) sind den Sicherheitssystemen zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen auf der Sicherheitsebene 3 im KKB die zwei ursprünglichen Sicherheitsstränge der Originalauslegung und das nach heutigen Anforderungen qualifizierte, gebunkerte Notstandssystem als dritter, diversitärer Strang zugeordnet. Dabei stellt (ENSI 2016i) jedoch auch fest, dass die ursprüngliche Auslegung des KKB mit zwei Sicherheitssträngen das Prinzip der räumlichen

Trennung zum Schutz vor Störungen mit übergreifendem Charakter nicht in vollem Umfang berücksichtigte. Daher werde die Anlage mit umfangreichen Nachrüstungen des Notstandsystems, des Notspeisewassersystems, aber auch des Reaktorschutzsystems sowie den Nachrüstungen im Rahmen des Projekts AUTANOVE systematisch verbessert.

Die in der Anlage Beznau für die Nachweisführung der Ereignisse auf Sicherheitsebene 3 zugrunde gelegte Überlagerung von auslösenden Ereignissen und einem davon unabhängigen Einzelfehler ist Tabelle 6.1-2 in (ENSI 2016i) zu entnehmen. Demnach werden verschiedene Ereignisse, die als auslösendes Ereignis der Sicherheitsebene 3 zugeordnet werden, bei einem zusätzlich überlagerten Einzelfehler aus probabilistischen Überlegungen heraus nur noch als auslegungsüberschreitende Ereignisse behandelt, vgl. auch die Anforderungen in (ENSI 2009a). Für auslegungsüberschreitende Ereignisse gelten grundsätzlich andere, geringere Nachweisanforderungen als für Ereignisse der Sicherheitsebene 3.

Um die ausreichende Verfügbarkeit der Sicherheitssysteme im Anforderungsfall sicherzustellen, sind in der Technischen Spezifikation des KKB für das Instandhaltungsverfahren gemäß (ENSI 2016i) entsprechende Vorgaben festgelegt. Nach (ENSI 2012b) ist in der Anlage Gösgen im Betriebsreglement festgelegt, dass Instandhaltungsarbeiten zeitgleich jeweils nur an einer Redundante stattfinden dürfen, auch müsse insbesondere während eines Anlagenstillstands immer mindestens ein Strang des Notstandsystems für die Kernkühlung verfügbar sein. In der Anlage Beznau seien vergleichbare Regelungen im Betriebsreglement enthalten. Allerdings wird nicht genauer spezifiziert, welche Mindestverfügbarkeiten oder zulässigen Instandhaltungszeiten während des Leistungsbetriebs für die Anlage KKB gefordert sind.

Als zweiter wesentlicher Kritikpunkt würden in (Brettner et al. 2012) die Einrichtungen und Maßnahmen des vorbeugenden und mitigativen Notfallschutzes auf der Sicherheitsebene 4 nicht angemessen berücksichtigt. Da das schweizerische Regelwerk schon seit längerem ein hohes Sicherheitsniveau auf allen Sicherheitsebenen fordere, während sich in Deutschland die Regelwerksvorgaben bis vor kurzem auf die Einrichtungen und Maßnahmen der Sicherheitsebene 3 fokussierte, sei in (Brettner et al. 2012) kein vollständiges Bild der Widerstandsfähigkeit des Kernkraftwerks Beznau gegen auslegungsüberschreitende Störfälle dargelegt worden.

Nach (ENSI 2013a) verfügen die schweizerischen Kernkraftwerke über drei Abfahrpfade, von denen der erste Abfahrpfad aus den herkömmlichen Sicherheitssystemen gebildet wird, der zweite Abfahrpfad durch die Notstandsysteme gewährleistet wird, die speziell für extreme Einwirkungen von außen verfügbar sein sollen, und der dritte Abfahrpfad durch Maßnahmen im Rahmen des präventiven Notfallschutzes, speziell in Form von Handmaßnahmen vor Ort zum Einsatz vorhandener oder zusätzlicher mobiler Einrichtungen, gebildet wird.

In (ENSI 2015a) stellt die Aufsichtsbehörde fest, dass die schweizerischen Anlagen in einer ersten Phase nach einem schweren Unfall alleine mit den auf der Anlage vorhandenen Einrichtungen auskommen müssen. Vor diesem Hintergrund wurden in verschiedenen Anlagen zusätzliche mobile Einrichtungen angeschafft und vor Ort auf den Anlagen deponiert.

## 2.4. Auflagen und Nachrüstungen

Bereits im Aktionsplan Fukushima des ENSI von 2012 (ENSI 2012a) werden 37 wesentliche, aus dem Unfallablauf in Fukushima in (ENSI 2011e) abgeleitete Prüfpunkte sowie weitere 8 als offene Punkte im Abschlussbericht zum EU-Stresstest (ENSI 2011c) identifizierte Aspekte aufgegriffen. Weiterhin wurde auf die in den ENSI-Verfügungen (ENSI 2011g, 2011j, 2011i, 2011h, 2012f) benannten Sofortmaßnahmen und weiteren Prüfpunkte eingegangen und daraus eine Gesamtliste

für die Verfolgung der erforderlichen Analysen und Nachrüstungen der schweizerischen Kernkraftwerke im Allgemeinen und der Anlage Beznau im Speziellen abgeleitet. Als zeitlicher Rahmen für die Abarbeitung dieser identifizierten Punkte wird das Ende des Jahres 2015 benannt. In (ENSI 2014d, IAEA-AP8.2) wird darauf hingewiesen, dass die Fertigstellung größerer Nachrüstmaßnahmen ggf. weitere zwei Jahre (über das Ende des Jahres 2015 hinaus) benötigen wird. Eine übersichtliche Darstellung zu Maßnahmen nach Fukushima gibt (Schwarz 2015).

Die Umsetzung der Arbeiten wird in den bis 2016 jährlich veröffentlichten Aktionsplänen (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2015a) dargestellt. Eine abschließende Darstellung zur Umsetzung der aus Fukushima und dem EU-Stresstest abgeleiteten Maßnahmen wurde mit (ENSI 2016g) vorgelegt.

Grundsätzlich bestätigt das ENSI (ENSI 2013a), dass

*„die schweizerischen Kernkraftwerke einen hohen Schutz gegen die Auswirkungen von Erdbeben, Überflutung und deren Kombination aufweisen und das geeignete Vorkehrungen gegen den Verlust der Stromversorgung und der Wärmesenke getroffen wurden.“*

Dennoch fordert das ENSI substantielle Nachrüstungen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit. Über die bereits 2012 berücksichtigten Punkte hinaus werden dabei auch zwei Empfehlungen des Peer-Reviews des EU-Stresstests für die schweizerischen Anlagen sowie sieben Empfehlungen eines Berichts der Eidgenössischen Kommission für Nukleare Sicherheit zu Fukushima erfasst.

Die in den Aktionsplänen benannten Aspekte werden in den einzelnen in diesem Gutachten betrachteten Themenfelder in den Kapitel 3 bis 8 wiedergegeben und bewertet.

Im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde die Notstromversorgung der Anlage Beznau umgerüstet, vgl. (Brettner et al. 2012, Kap. 4.2.3) und Kap. 6.

Gemäß (ENSI 2016b) gilt, dass Strukturen, Systeme und Komponenten für auf der Sicherheitsebene 3 erforderliche Sicherheitsfunktionen gegen die zum Zeitpunkt ihrer Errichtung von der Aufsichtsbehörde akzeptierten Gefährdungsannahmen durch naturbedingte und zivilisatorische Einwirkungen auszulegen oder zu schützen sind.

Im Jahr 2013 sollten im Rahmen des Projekts ERSIM auf Basis deterministischer und probabilistischer Analysen diejenigen Bereiche identifiziert werden, in denen Nachrüstungen unter Berücksichtigung des Grundsatzes der Angemessenheit zu einer weiteren Erhöhung der Sicherheitsmargen führen können, wobei ein Fokus auf der Stärkung des dritten Abfahrpfads, also den Maßnahmen auf Sicherheitsebene 4 liegt.

Nach (ENSI 2014a) wurden Anforderungen und Randbedingungen für diese Analysen in 2013 finalisiert. Der Termin für die Einreichung von Analysen zu Erdbeben und externer Überflutung (unter Berücksichtigung beispielsweise des Auftriebs von Gebäuden) wurde auf den 30.04.2014 verlängert. Weiterhin sollte geklärt werden, ob neben den externen Einwirkungen Erdbeben und Überflutung weitere Ereignisse, wie beispielsweise eine interne Überflutung, ebenfalls zu analysieren seien. In (ENSI 2016g) stellt das ENSI fest, dass gemäß der Analysen zu Erdbeben für die Anlage Beznau im Anlagenzustand „kalt abgestellt“ geringere seismische Sicherheitsmargen als im Anlagenzustand „heiss abgestellt“ vorhanden sind. Im Aufsichtsverfahren werde daher weiterverfolgt, inwieweit die Sicherheitsmargen im Anlagenzustand „kalt abgestellt“ noch erhöht werden können. Bezüglich einer naturbedingten Überflutung verfüge KKB über deutliche Sicherheitsmargen.

Den Analysen der Betreiber waren dabei nach (ENSI 2015a) die aktuell gültigen Gefährdungsannahmen für ein Erdbeben (gemäß PRP-IH, siehe hierzu Kap. 3) und eine externe Überflutung mit einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}$  pro Jahr zugrunde zu legen.

## 2.5. Stellungnahme

Der Betreiber stellt in seiner knappen Erwiderung auf das Gutachten des Öko-Instituts von 2012 fest, dass wichtige Sicherheitssysteme nicht berücksichtigt seien und die Darstellung bezüglich der Möglichkeiten für eine Blockstützung nicht die Gegebenheiten in der Anlage KKB widerspiegele. Demgegenüber bestätigt ENSI, dass die technischen Merkmale der fest installierten Sicherheitssysteme überwiegend richtig dargestellt und die vorgenommene Bewertung auf Basis des definierten Bewertungsmaßstabs im Wesentlichen korrekt sei.

Hinsichtlich der vorhandenen Kühlmöglichkeiten und den Möglichkeiten zur Blockstützung wurden diese bereits in unserem Gutachten (Brettner et al. 2012) in den zugehörigen Kapiteln gewürdigt, vgl. hierzu auch die aktuelle Darstellung insbesondere in Kap. 7. Auch die vom Betreiber aufgeführten, bereits vor dem Ereignis in Fukushima in der Anlage KKB realisierten Nachrüstungen wurden von uns in (Brettner et al. 2012) entsprechend wiedergegeben.

Gemäß den Anforderungen des schweizerischen Regelwerks sind bei Mehrblockanlagen die Schutzzielfunktionen für jeden einzelnen Kernkraftwerksblock soweit möglich und angemessen unabhängig von denjenigen der anderen Kraftwerksblöcke zu gewährleisten. Hierin spiegelt sich wider, dass die Möglichkeiten zu Blockstützung, da sie in aller Regel nicht automatisiert sind, Handmaßnahmen erfordern und teilweise hinsichtlich der verfügbaren systemtechnischen Kapazitäten auch nicht für eine gleichzeitige Versorgung beider Blöcke ausreichend sind, nicht als gleichwertig zu echten Redundanzen des Sicherheitssystems anzusehen sind. Dies wurde im Rahmen der vorgenommenen Bewertungen in (Brettner et al. 2012) sowie in den im Folgenden vorgenommenen aktualisierten Bewertungen auch entsprechend berücksichtigt.

Wir leiten aus den diesbezüglichen Aussagen des Betreibers daher keine Änderungsnotwendigkeit an den in (Brettner et al. 2012) vorgenommenen Bewertungen ab.

Wesentliche, bereits vor Fukushima geplante jedoch erst nach Fukushima umgesetzte Nachrüstungen betreffen u. a. das Projekt AUTANOVE, worauf u. a. in Kap. 6 detaillierter eingegangen wird.

Die Aufsichtsbehörde verweist darauf, dass im Unterschied zum deutschen Regelwerk im KKW Beznau eine Instandhaltung an einer Redundante in den Einrichtungen zur Störfallbeherrschung während des Leistungsbetriebs grundsätzlich nicht zulässig ist, und daher kein Instandhaltungskriterium zu erfüllen sei. Das schweizerische Regelwerk fordert lediglich die Berücksichtigung eines Einzelfehlers unabhängig vom auslösenden Ereignis. Zwar muss diese Einzelfehlerfestigkeit auch während Wartung und Prüfung aufrechterhalten werden, dabei handelt es sich jedoch gegenüber Instandhaltungszeiträumen nur um zeitlich kurz anstehende Zustände, vgl. z. B. auch die entsprechenden Einschränkungen im deutschen Regelwerk (BMUB 2015, Anhang 4, 3.3.2).

Damit entspricht die Anlage Beznau in diesen Fällen grundsätzlich internationalen Anforderungen an die Einzelfehlerfestigkeit des Sicherheitssystems, wie z. B. (WENRA 2014, E8.2).

Hierzu ist allerdings einschränkend festzuhalten, dass für verschiedene, als auslösendes Ereignis der Sicherheitsebene 3 zugeordnete Ereignisse aus probabilistischen Gründen das mit dem Einzelfehler überlagerte Ereignis als auslegungsüberschreiten betrachtet wird, die Nachweise zur

Störfallbeherrschung von der Anlage KKB daher ohne Überlagerung eines Einzelfehlers geführt werden.

Eine eingeschränkte Berücksichtigung eines Einzelfehlers bei auslösenden Ereignissen, die der Sicherheitsebene 3 zuzuordnen sind, stellt aus unserer Sicht eine Abweichung von internationalen Anforderungen und damit einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Für verschiedene Sicherheitsfunktionen ist zur Ergänzung der ursprünglich zweisträngigen Auslegung des Sicherheitssystems ein zusätzlicher Strang des Notstandssystems verfügbar. Für diese Systemfunktionen wäre bei Ereignissen, die nicht zu einer Unverfügbarkeit der Stränge des ursprünglichen Sicherheitssystems führen, ein (n+2)-Redundanzgrad vorhanden, es könnte also neben dem Einzelfehler auch ein Instandhaltungsfall überlagert werden.

In Deutschland liegt der Auslegung des Sicherheitssystems das Einzelfehlerkonzept zugrunde, vgl. (BMUB 2015, 3.1(7)). Dabei ist im Anforderungsfall sowohl ein ungünstigst wirkender Einzelfehler als auch eine gleichzeitig mit dem Einzelfehler ungünstigst wirkende Unverfügbarkeit infolge von Instandhaltungsmaßnahmen (vorbeugende Instandhaltungen oder ungeplante Instandsetzungsfälle) zu unterstellen. Daraus resultiert für die deutschen Anlagen grundsätzlich ein (n+2) Redundanzgrad, was über internationale Anforderungen wie z. B. (WENRA 2014, E8.2) hinausgeht.

In Deutschland ist eine vorbeugende (geplante) Instandhaltung auch während des Leistungsbetriebs der Anlagen zulässig. Für solche Zeiträume ist der verfügbare Redundanzgrad entsprechend auf (n+1) reduziert. Allerdings sind vorbeugende Instandhaltungen während des Leistungsbetriebs nur unter Einhaltung verschiedener einschränkenden Randbedingungen zulässig. So muss sichergestellt sein, dass die übrigen Redundanten soweit verfügbar sind, dass für die Dauer des Instandhaltungsvorgangs die Anforderungen des Einzelfehlerkonzepts eingehalten sind (BMUB 2015, Anh. 4, 3.1(1)). Weiterhin sollen Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung grundsätzlich in Betriebsphasen durchgeführt werden in denen eine Anforderung dieser Einrichtung nicht ansteht oder wenig wahrscheinlich ist, so z. B. während des Nichtleistungsbetriebs (BMUB 2015, Anh. 4, 3.3.1 (1)). Sollen vorbeugende Instandhaltungen dennoch während des Leistungsbetriebs durchgeführt werden, so ist die gesamte daraus resultierende Unverfügbarkeit von Einrichtungen zeitlich zu begrenzen. Ohne detaillierte Nachweisführung darf nach (BMUB 2015, Anh. 4, 3.3.3 (2)) bei (n+2)-Einrichtungen die Unverfügbarkeitsdauer pro Redundante und Jahr maximal 7 Tage betragen.

Kommt es in deutschen Anlagen während des Leistungsbetriebs zur Feststellung von Mängeln an sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen, die einen (ungeplanten) Instandsetzungsfall nach sich ziehen, so sind unverzüglich Maßnahmen zur Behebung des Mangels einzuleiten. Zulässige Instandsetzungszeiten sind ebenfalls zeitlich begrenzt, kann der Mangel nicht innerhalb der zulässigen Instandsetzungszeiten behoben werden, so ist die Anlage in einen in den Betriebsvorschriften vorgegebenen Anlagenzustand zu überführen (BMUB 2015, Anh. 4, 3.2), d. h. in der Regel ist die Anlage abzufahren.

Grundsätzlich sind auch in der Technischen Spezifikation der Anlage KKB die zulässigen Instandhaltungen begrenzt, genauere Angaben hierzu liegen jedoch nicht vor, so dass ein detaillierterer Vergleich nicht möglich ist.

Insgesamt ist aber festzuhalten, dass der in Deutschland realisierte (n+2) Redundanzgrad durch Instandhaltungsmaßnahmen während des Leistungsbetriebs für begrenzte Zeiten in der Größenordnung von vier Wochen pro Jahr eingeschränkt (n+1 Redundanzgrad) verfügbar sein kann. Für den Großteil der Zeiten des Leistungsbetriebs ist dieser Redundanzgrad jedoch als

uneingeschränkt verfügbar anzusehen. Auch bei den grundsätzlich erforderlichen Instandhaltungsarbeiten an einzelnen Redundanten während des Nichtleistungsbetriebs (also bei abgeschalteter Anlage) ist in den deutschen Anlagen mindestens ein einzelfehlerfester Zustand gegeben.

In der Anlage KKB ist nicht für alle Sicherheitsfunktionen und nicht bei allen Ereignissen eine Einzelfehlerfestigkeit oder gar eine Einzelfehlerfestigkeit bei gleichzeitig unterstelltem Instandsetzungsfall gegeben. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Das ENSI verweist weiterhin darauf, dass die in (Brettner et al. 2012) vorgenommenen Bewertungen insbesondere die auf Sicherheitsebene 4 vorhandenen, nicht fest installierten Sicherheitseinrichtungen der Anlage KKB nicht angemessen berücksichtigen würde, da diese Sicherheitsebene in Deutschland regulatorisch erst seit kurzem erfasst sei.

Diesbezüglich ist festzustellen, dass die vom Betreiber der Anlage KKB aufgeführten, auf Sicherheitsebene 4 vorhandenen Maßnahmen und Einrichtungen

- zur sekundärseitigen und primärseitigen Druckentlastung und Bespeisung („Bleed and Feed“),
- zum autokatalytischen Abbau von Wasserstoff im Sicherheitsbehälter und,
- zur gefilterten Containment-Druckentlastung sowie
- durch mobile Einrichtungen (mobile Diesel, mobile Feuerwehropumpen, Betriebsmittel)

ebenfalls bereits vor Fukushima in Deutschland eingeführt und auch nach Fukushima weiter ergänzt wurden – vergleichbar zu den in der Anlage KKB nach Fukushima ergänzten mobilen Einrichtungen, siehe hierzu auch die Diskussion in den folgenden Kapiteln. Prozeduren zum Einsatz dieser Einrichtungen waren in den deutschen Anlagen bereits vor Fukushima im Rahmen eines Notfallhandbuchs implementiert.

Die in den schweizerischen Anlagen teilweise darüber hinausgehenden Prozeduren und Handlungsanweisungen im Rahmen von SAMGs wurden in Deutschland durch die Einführung eines Handbuchs für mitigative Notfallmaßnahmen in allen Anlagen mit der Genehmigung zum Leistungsbetrieb ergänzt (BMUB 2016).

Auch gebunkerte Notstandssysteme waren in allen Anlagen in Deutschland entweder nachgerüstet worden oder bereits auslegungsgemäß seit Errichtung der Anlagen im Sicherheitskonzept enthalten.

Schließlich hat bereits der Betreiber selbst festgestellt, dass die auf der Sicherheitsebene 4 vorhandenen Maßnahmen und Einrichtungen nicht dazu herangezogen werden können, vorhandene Sicherheitsdefizite auf der Sicherheitsebene 3 zu kompensieren. Vielmehr müssen gerade die fest installierten Einrichtungen der Sicherheitsebene 3 besonders robust ausgelegt sein, um das Eintreten von Ereignissen der Sicherheitsebene 4 mit hoher Zuverlässigkeit auszuschließen. So stellt auch die Aufsichtsbehörde selbst fest, dass die Anlage KKB als Altanlage in verschiedenen Beziehungen Abweichungen zu dem von neueren Anlagen geforderten Sicherheitsniveau insbesondere auf der Sicherheitsebene 3 aufweise. Dies spiegelt sich auch in den insgesamt zwar über die letzten Jahrzehnte deutlich verbesserten, jedoch gerade mit Blick auf Einwirkungen von außen immer noch ungünstigen Ergebnissen der Probabilistischen Sicherheitsanalyse der Anlage KKB wieder.

Die auf der Sicherheitsebene 4 im Bereich des vorbeugenden und mitigativen Notfallschutzes implementierten Maßnahmen wurden von uns umfassend berücksichtigt. Dessen ungeachtet

verbleiben aus unserer Sicht jedoch spezifische Defizite insbesondere auf den vorgelagerten Sicherheitsebenen, die durch Einrichtungen auf der Sicherheitsebene 4 nicht kompensiert werden. Wir leiten aus den diesbezüglichen Aussagen der Aufsichtsbehörde daher keine Änderungsnotwendigkeit an den in (Brettner et al. 2012) vorgenommenen Bewertungen ab.

Im Rahmen des Projekts ERSIM wird für die Anlage KKB eine systematische Analyse zu Möglichkeiten für die weitere Erhöhung der Sicherheitsmargen durchgeführt. Entsprechende Robustheitsanalysen wurden auch in Deutschland gefordert und sind weitgehend abgeschlossen (BMUB 2016).



### 3. Erdbeben

Im Folgenden werden als Basis für die weitere Untersuchung zunächst die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) wiedergegeben. Daran anschließend werden, zunächst einfürend neuere Arbeiten zur Erdbebengefährdung in der Schweiz vorgestellt, die für das Themenfeld von besonderer Relevanz sind. Darauf aufbauend werden, Erkenntnisse aus Darstellungen des Betreibers sowie der Aufsichtsbehörde zusammengefasst. Weiterhin wird u. a. auf Basis von (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) dargestellt, welche Auflagen bzw. Nachrüstungen mit Relevanz für die hier identifizierten Schwachstellen zwischenzeitlich beschlossen wurden.

#### 3.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Die deutschen Anlagen weisen eine Grundausslegung gegen ein Erdbeben mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr auf. Für die Beherrschung eines solchen Erdbebens stehen mit dem Notspeisesystem, dem Not- und Nachkühlsystem sowie den zugehörigen Hilfssystemen zur elektrischen Energieversorgung Sicherheitssysteme zur Verfügung. Diese gewährleisten auch bei einem unterstellten Ausfall eines Stranges aufgrund eines Einzelfehlers in Kombination mit der Unverfügbarkeit eines weiteren Stranges infolge einer Instandsetzung die Nachwärmeabfuhr, d. h. von den jeweils vorhandenen vier Strängen sind zwei Stränge auslegungsgemäß für die Beherrschung des Ereignisses ausreichend (n+2 Redundanzgrad).

Das Sicherheitserdbeben SSE ist gemäß Schweizer Regelwerk festgelegt durch die Anforderung, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten der zugehörigen Einwirkungen höchstens  $10^{-4}$  pro Jahr betragen soll (UVEK 2009). Angaben zum zugehörigen Fraktile sind in (UVEK 2009) nicht enthalten. Demgegenüber regelt die aktuelle Fassung der KTA 2201.1 (KTA 2011), dass im Rahmen der Auslegung Erdbeben mit einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr zu berücksichtigen sind (50% Fraktile). Diese Überschreitungshäufigkeit entspricht auch dem RSK Basislevel.

Derzeit laufen im Rahmen des Pegasos Refinement Project (PRP) Untersuchungen zu einer Neufestlegung der Erdbebengefährdungskurven. Das ENSI erwartet, dass das zukünftig zu Grunde zu legende Gefährdungspotenzial höher liegt und somit die Auslegungsanforderungen nach dem Abschluss des PRP höher sein werden als die aktuelle Auslegung der Anlage.

Die in dem Projekt PEGASOS ermittelten Erdbebeneinwirkungen werden aufgrund der angewandten Methodik international als sehr konservativ angesehen.

Zur Beherrschung des SSE ist im KKB gegenwärtig auslegungsgemäß das Notstandssystem vorgesehen. Dies führt dazu, dass im Vergleich zu den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen eine geringere Zahl von Redundanten zur Ereignisbeherrschung zur Verfügung steht. Insbesondere führt die Überlagerung von Einzelfehler und Instandhaltungsfall an bestimmten gleichartigen aktiven Komponenten der Notstandssysteme (Notstromdieselaggregate, Brunnenwasserpumpen) zum blockübergreifenden Ausfall der entsprechenden Funktion und würde somit auslegungsgemäß nicht beherrscht.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Leistungsbetrieb stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand im Falle eines SSE auslegungsgemäß zwei Pfade zur Verfügung, die z.T. gemeinsame Komponenten nutzen. Einer der beiden Pfade erfordert Maßnahmen, die in Deutschland als Notfallmaßnahmen eingestuft würden (primärseitiges Bleed-and-Feed). Die

Einrichtungen des anderen Pfads (u. a. das Notstand-Speisewassersystem zur Dampferzeugerbespeisung) weisen einen Redundanzgrad von (n+0) mit einer Kapazität von 1 x 100% auf.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand im Falle eines SSE auslegungsgemäß zwei Pfade zur Verfügung, die z. T. gemeinsame Komponenten nutzen. Mit beiden Pfaden ist ein Wassereintrag in das Primärcontainment verbunden, bei geschlossenem PKL ist eine Öffnung desselben zur Dampf- und Wasserabgabe in das Containment erforderlich. Diese Fahrweisen würden in Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft, da die Nachkühlketten gegen Erdbeben ausgelegt sind und somit keine Erfordernis für eine derartige Fahrweise besteht.

Damit entspricht die Grundausslegung der Anlage Beznau nicht dem Sicherheitsstatus deutscher Anlagen.

Für die deutschen Anlagen hat die RSK das Potential für Reserven in Höhe einer Erdbebenintensitätsstufe festgestellt, wobei diese jedoch in der Regel mit den vorgelegten Unterlagen nicht abschließend nachgewiesen werden konnten. Eine Erhöhung der Erdbebenintensität um eine Stufe entspräche etwa einem Faktor zwei in den abtragbaren Beschleunigungen.

Hinsichtlich der bestehenden Reserven in der Erdbebenauslegung des KKB ergibt sich auf Basis der im Rahmen des EU-Stresstests angegebenen Werte, dass der Sicherheitsfaktor gegenüber Erdbebeneinwirkungen zu einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr (entsprechend der Grundausslegung der deutschen Anlagen) 1,7 beträgt. Diese Aussage basiert auf der Erdbebengefährdungskurve, die der aktuellen Auslegung des KKB zu Grunde liegt.

Unter der Voraussetzung, dass das von der RSK festgestellte Robustheitspotenzial der deutschen Anlagen von einer Erdbebenintensitätsstufe nachgewiesen werden kann, sind die für die Anlage Beznau ausgewiesenen Reserven etwas geringer als diejenigen der deutschen Anlagen.

Eine Erhöhung der Zahl der nach einem SSE im KKB zur Nachwärmeabfuhr über die Dampferzeuger verfügbaren Stränge ergibt sich nach Realisierung des Projekts AUTANOVE. Hierdurch wird zusätzlich zum Notstandsystem ein weiterer erdbebensicherer Strang unter Nutzung des Notspeisewassersystems zur Verfügung stehen. Eine blockweise Beherrschung von Einzelfehler und Instandhaltungsfall – wie in den deutschen Anlagen - ergibt sich allerdings auch daraus noch nicht.

### **3.2. Forschungsarbeiten zu den in der Schweiz zu unterstellenden Gefährdungsannahmen**

Mit den Vorhaben „Pegasos“ und „Pegasos Refinement Project“ (PRP) wurden in den letzten Jahrzehnten die Erdbebengefährdungsannahmen in der Schweiz umfassend neu bestimmt.

#### **3.2.1. Pegasos**

Die damalige Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), das heutige ENSI forderte 1999 die schweizerischen Kernkraftwerksbetreiber zu einer Neubewertung der Erdbebengefährdung auf. Daraufhin beauftragte die Vereinigung der Schweizer Kernkraftwerksbetreiber UAK die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) mit der Planung, Organisation und Durchführung einer probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz. Das Projekt PEGASOS

(Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites) sollte dabei auch bestehende Unsicherheiten systematisch und umfassend beurteilen. Die weltweit neuesten Erkenntnisse und Methoden aus der Erdbebenforschung sollten mit einbezogen werden, repräsentiert durch die Level 4 Kriterien des amerikanischen Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC), das diese im Auftrag der U.S.-NRC, des U.S.-DoE und des EPRI erarbeitet hat. Das Projekt Pegasos wurde in vier Teilprojekte unterteilt (Bestimmung der Erdbebenquellen, der Erdbebenausbreitung, der Standorteinflüsse und der Gefährdungsergebnisse). Im Jahr 2004 wurden die Ergebnisse des gemeinsamen Projektes der Betreiber zur neuen Analyse der Erdbebengefährdung der Kernkraftwerke in der Schweiz vorgelegt, siehe (Nagra 2004) und von der HSK bewertet (HSK 2007). Für die Anlage Beznau ergab sich als Mittelwert der horizontalen Bodenbeschleunigung bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $10^{-4}/a$  ein Wert von ca. 0,42 g (Nagra 2004).

Die Arbeiten zu Pegasos wurden von einer ganzen Reihe renommierter Erdbebenwissenschaftler in verschiedenen Gruppen bearbeitet. Die Ergebnisse wiesen zwischen den einzelnen Gruppen zum Teil sehr hohe Streubreiten auf. Zudem lagen sie erheblich über den bis dahin der Auslegung der Schweizer KKW zugrunde gelegten Gefährdungsannahmen.

Aufgrund der mit den Ergebnissen der Pegasos-Studie verbundenen Unsicherheiten wurde in 2008 eine Überarbeitung der Vorgehensweise im Rahmen des sogenannten Pegasos Refinement Project (PRP) eingeleitet.

### 3.2.2. PRP Intermediate und PRP

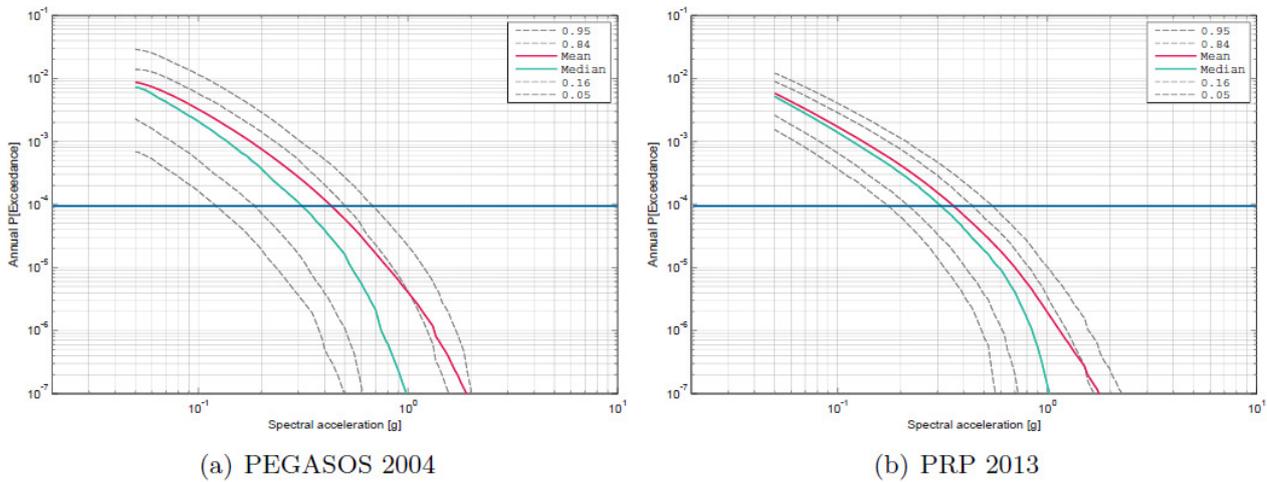
Im Jahr 2011 veröffentlichte der Dachverband der Schweizer Stromverbundunternehmen Axpo Holding, Alpiq Holding und BKW Energie AG Zwischenresultate zum PRP, in denen auch seismische Gefährdungsannahmen „PRP Intermediate Hazard Spektren“ (PRP-IH) für die Schweizer Kernkraftwerke enthalten waren (swissnuclear 2011). Allerdings gaben diese nur die Resultate für den Felshorizont wieder. Um Zwischenresultate an der Geländeoberfläche und für tieferliegende Niveaus der Gebäudefundamente (-15 m) zu erhalten, mussten die standortspezifischen Bodenprofile, Materialparameter und Verstärkungsfunktionen aus dem PRP-IH herangezogen werden. Diese Aufgabe fiel den einzelnen KKW zu.

Die abschließenden Berichte der Betreiber zum PRP wurden Ende 2013 fertiggestellt (swissnuclear 2013). Es wurden die Veränderungen in den epistemischen Unsicherheiten der Gefährdungen von Pegasos zu Pegasos Refinement durch eine Sensitivitätsanalyse bewertet. Dabei seien die Unsicherheiten bei den einheitlichen Bodenspektren für hohe Frequenzen (> 5 Hz) von Faktoren von nahezu 6 auf nahezu 3 reduziert worden.

Es wurden für die vier schweizerischen KKW-Standorte Gefährdungskurven und Beschleunigungsspektren für den Felshorizont und für die Geländeoberfläche übermittelt. Wie es bereits die Zwischenresultate PRP-IH erwarten ließen, resultierten aus dem PRP gegenüber Pegasos geringere Streubreiten der Gefährdungskurven und ein niedrigeres Gefährdungsniveau.

Für die Anlage Beznau verringert sich der Mittelwert der horizontalen Bodenbeschleunigung bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $10^{-4}/a$  von ca. 0,43 g (Nagra 2004) auf ca. 0,35 g (swissnuclear 2013), siehe Abbildung 3-1.

**Abbildung 3-1: Vergleich der Gefährdungskurven für die Geländeoberfläche des Standorts Beznau von Pegasos 2004 und PRP 2013**

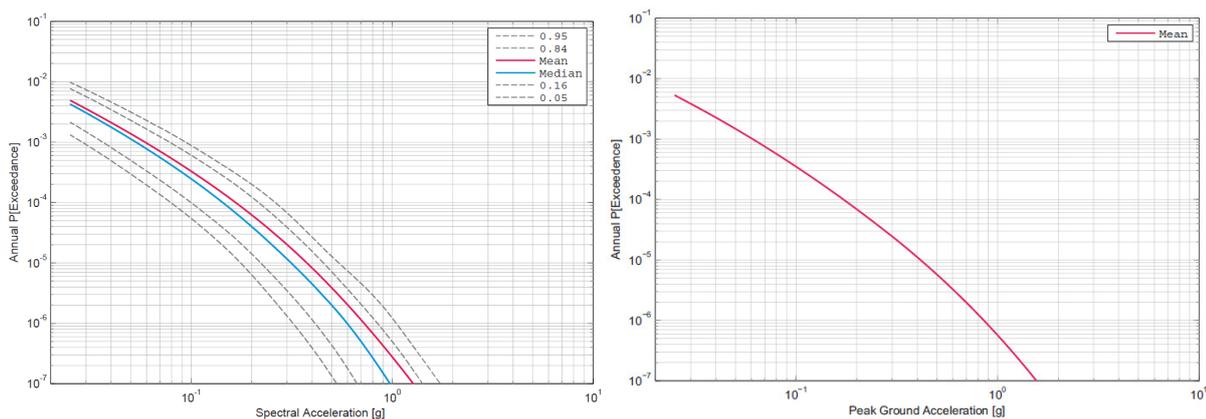


Quelle: (swissnuclear 2013), Seite 258

Einen Vergleich der neu ermittelten mittleren Gefährdungskurven mit den vorläufigen Kurven von 2011, die im Rahmen der Post-Fukushima Analysen vom ENSI angefordert wurden (PRP-IH), zeigt Abbildung 3-2.

Zudem bestätigte sich die Erkenntnis aus Pegasos, dass standortnahe Erdbeben mit relativ kleinen Magnituden zwischen 5 und 6 die Gefährdung stärker beeinflussen als weiter entfernte und stärkere Beben.

**Abbildung 3-2: Vergleich der Gefährdungskurven für den Felshorizont des Standorts Beznau von PRP 2013 (links) und PRP-IH (rechts)**



Quelle: (swissnuclear 2013), (swissnuclear 2011)

### 3.2.3. Schweizer Erdbebendienst National Hazard 2015 Projekt

Teilweise zeitgleich, aber nach eigener Aussage weitgehend unabhängig von den durch Schweizer Energieversorgungsunternehmen finanzierten Pegasos-Studien führte der Schweizer Erdbebendienst (SED) zwei eigene, ebenfalls rein probabilistische Erdbebengefährdungsanalysen

für das gesamte Gebiet der Schweiz durch, deren Ergebnisse der SED jeweils in den Jahren 2004 und 2015 veröffentlichte. Die Erdbebengefährdungsanalysen des SEDs basieren auf den gleichen Datengrundlagen, Erkenntnissen und Methoden, die auch bei PRP herangezogen wurden. Die aktuellen Ergebnisse von 2015 sind in (SED & ETH 2016) auch im Vergleich zu PRP beschrieben und kommentiert.

Berücksichtigt man noch die in einem vergleichbaren Zeitraum durchgeführte europäische Harmonisierung der Erdbebengefährdungsannahmen im Rahmen des Projektes SHARE zeigt sich der besondere Umfang der wissenschaftlichen Diskussion zu Gefährdungsannahmen in der Schweiz.

### 3.3. Darlegungen des Betreibers

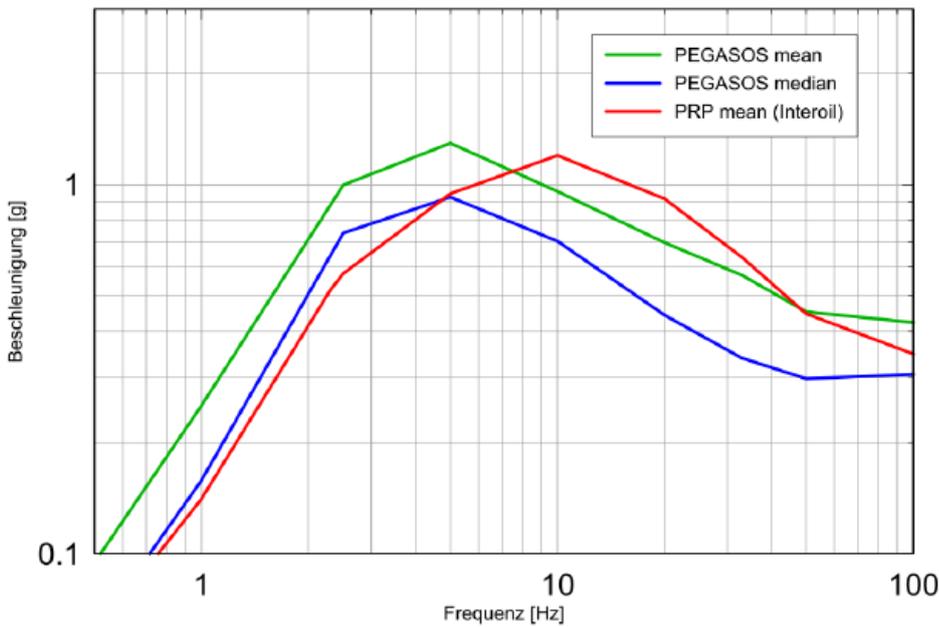
#### 3.3.1. Erdbebengefährdung des KKB

Die Kernschadenshäufigkeit (CDF) wurde im Stresstestbericht (axpo 2011e) mit  $1,71 \cdot 10^{-5}/a$  angegeben, wobei das Erdbeben mit  $1,27 \cdot 10^{-5}/a$  einen Anteil von 74,4% aufweist. Als Gefährdungsannahme wurden auch hier die PRP-IH-Werte verwendet.

KKB ließ die Erdbebengefährdung am Standort 2011 in zwei Schritten, zuerst für den Felshorizont in einer Tiefe von -145 m und dann daraus abgeleitet für verschiedene oberflächennahe Niveaus im Lockergestein bis zur Terrainoberfläche bestimmen. Diese Neuberechnung basierte auf den aktuellen per Mai 2011 aus dem Pegasos Refinement Project – Intermediate Hazard (PRP-IH) (swissnuclear 2011) verfügbaren qualitätsgesicherten Daten zum Felsuntergrund.

Die hieraus resultierenden Gefährdungsannahmen lagen zwar unter den Pegasos-Ergebnissen, wie die Breitband-Antwortspektren (Uniform Hazard Spectra UHS) an der Geländeoberfläche in Abbildung 3-3 verdeutlichen. Allerdings bedeuteten sie gegenüber den 2007 von HSK/ENSI verfügten, um 20% reduzierten Pegasos-Werten keine Entspannung. Nach Darstellung des ENSI in (ENSI 2012e) gab der Betreiber für die Ergebnisse des PRP-IH für die Geländeoberfläche in horizontaler Richtung bei einer Frequenz von 100 Hz eine maximale Bodenbeschleunigung (Peak Ground Acceleration, PGA) von 0,348 g an.

**Abbildung 3-3: Vergleich Uniform Hazard Spektren an Geländeoberfläche, Überschreitungshäufigkeit  $10^{-4}/a$ , Dämpfung 5%, Pegasos und PRP-Intermediate**



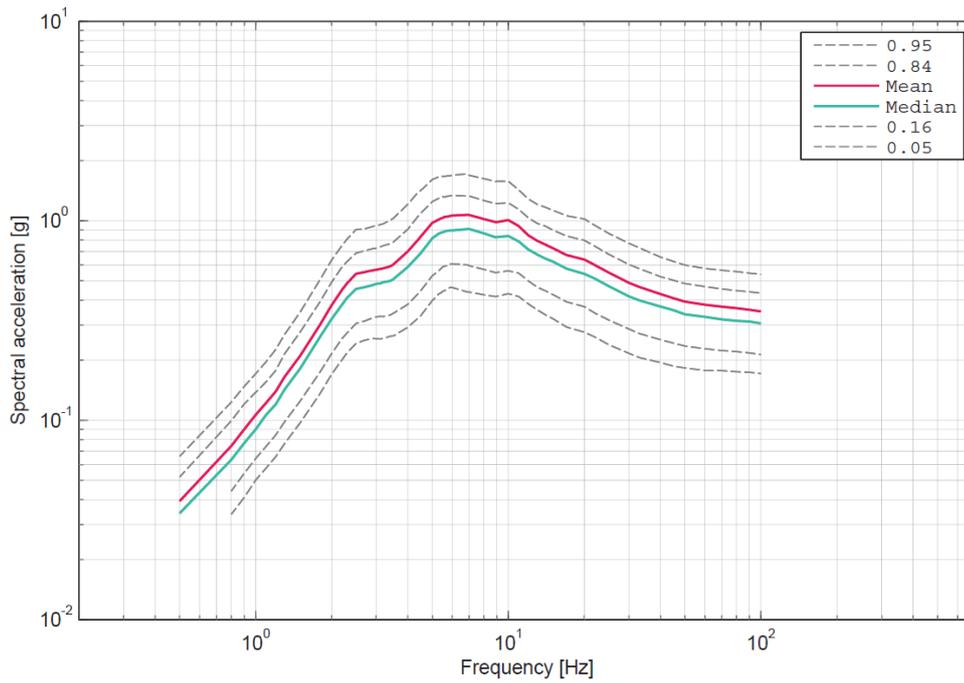
11: Vergleich Uniform Hazard Spektren an Geländeoberfläche, Dämpfung 5%, Jährlichkeit  $10^{-4}$

Quelle: (ENSI 2012e)

2013 wurden dann mit einer Revision Ende 2014 (swissnuclear 2013) die endgültigen Ergebnisse des Betreibers für die Geländeoberfläche des Standortes Beznau veröffentlicht. Allerdings werden keine konkreten PGA-Werte angegeben.

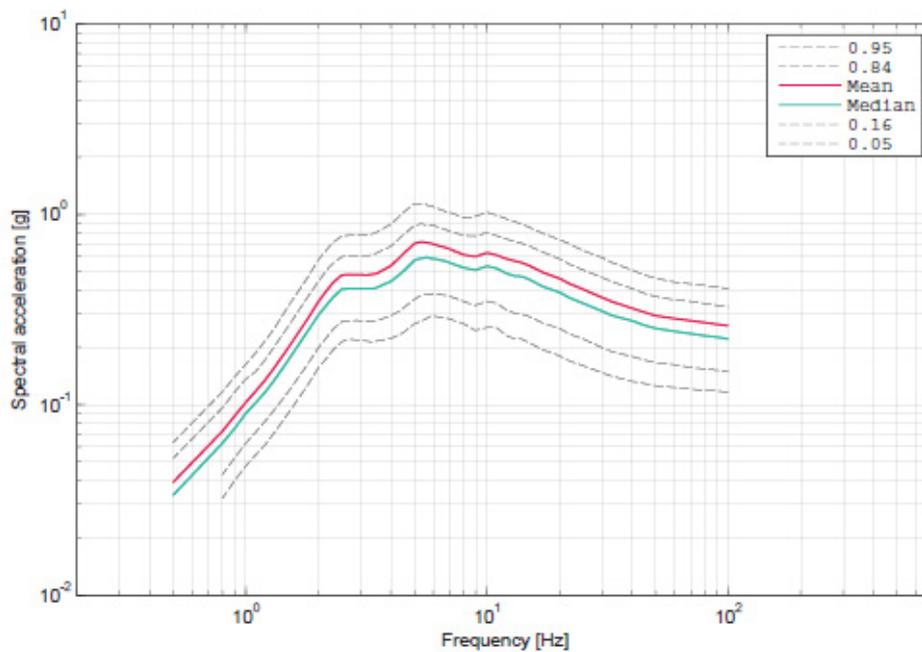
Nachfolgend ist das Bodenantwortspektrum des Betreibers auf Basis von PRP in Abbildung 3-4 für die Geländeoberfläche am Standort Beznau sowie in Abbildung 3-5 in -15 m Tiefe (entsprechend der Fundamentunterkante), jeweils für eine Überschreitungshäufigkeit von einmal in 10.000 Jahren zu sehen. Gemäß der Abbildung 3-4 gibt der Betreiber für die Ergebnisse des PRP für die Geländeoberfläche in horizontaler Richtung bei einer Frequenz von 100 Hz eine maximale Bodenbeschleunigung (Peak Ground Acceleration, PGA) von ca. 0,35 g an.

**Abbildung 3-4: PRP Beznau horizontale Bodenbeschleunigung, Geländeoberfläche, Überschreitungshäufigkeit  $10^{-4}/a$ , 5% Dämpfung**



Quelle: (swissnuclear 2013)

**Abbildung 3-5: PRP Beznau horizontale Bodenbeschleunigung, Fundamentniveau -15 m, Überschreitungshäufigkeit  $10^{-4}/a$ , 5% Dämpfung**



Quelle: (swissnuclear 2013)

### 3.3.2. Fragility-Analysen des Betreibers

Die bis 2012 verwendeten Fragilityanalysen können teilweise den Angaben des Betreibers im Stresstestbericht nach Fukushima (axpo 2011e) entnommen werden. Bestimmend sind bei Erdbeben die Abfahrpfade, wobei das Minimum der Kapazitäten aller Ausrüstungen eines Abfahrpfades entsprechend dem schwächsten Glied in der Kette die seismische Grenztragfähigkeit bzw. die Fragility des ganzen Abfahrpfades bestimmt. Die Fragility des stärksten Abfahrstrangs definiert die Anlagenkapazität gegenüber dem Sicherheitserdbeben, wobei 2011 von der Gefährdungsstufe H2 ausgegangen wurde, also derjenigen Gefährdungsstufe, für die die Anlage Beznau in der Vergangenheit requalifiziert wurde (0,21 g an der Geländeoberfläche), siehe (Brettner et al. 2012) und (axpo 2011e).

Als limitierender Wert ergab sich ein HCLPF-Wert von 0,46 g. Limitierend sei die Notstandswechselstromausrüstung gewesen. (axpo 2011e) betont, dass die Kapazitäten der Systeme der Originalauslegung aufgrund der damaligen Stromversorgung aus dem Hydrowerk oder den Flutdieseln entsprechend geringer sei. Das Projekt AUTANOVE könne hier Abhilfe schaffen. Zur Bewertung der Sicherheitsmarge bei Erdbeben wurden die Fragilities derjenigen Einrichtungen betrachtet, die für die Funktion der Notstandssysteme zum Abfahren des Reaktors, für die Integrität der BE-Lagerbecken sowie für das Containment relevant sind.

Im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung von 2012 hat der Betreiber die Fragilityanalysen erneuert, wobei die Ergebnisse nicht veröffentlicht sind, sondern nur die Bewertung des ENSI. Berücksichtigt wurden hierbei die PRP-IH Gefährdungsannahmen. Die Fragilities wurden von Axpo erstmals Mitte der 80er Jahre ermittelt und seither mehrmals angepasst. Zuletzt wurden von Axpo die Fragilities bzw. HCLPF-Werte mithilfe des amerikanischen Verfahrens "Separation of Variables" gemäß EPRI TR-103959 erhoben (ENSI 2012e).

### 3.3.3. Erfolgte Erdbebennachrüstungen

Das Projekt AUTANOVE (AUTArke NOTstromVErsorgung) wurde aufgrund eines hohen Wertes für die Nichtverfügbarkeit der Notstromsysteme in 2007 als Ergänzung der Notstromversorgung mit zusätzlichen Notstromdieseln beschlossen, vgl. hierzu auch Kap. 6. Die Nachrüstung einer seismisch qualifizierten Notstromversorgung soll die bisherige Abhängigkeit der Nachwärmeabfuhrsysteme des KKB vom nicht ausreichend erdbebenfesten Wasserkraftwerk ersetzen.

Gemäß (Richner 2016) wurden in der Revision 2015 im Rahmen des Projekts AUTANOVE die bisherige Notstromversorgung aus dem Wasserkraftwerk Beznau sowie von zwei 380-V-Flutdieseln durch zwei neue, seismisch qualifizierte Notstromdieselgeneratoren pro Block ersetzt. Des Weiteren erfolgt die Installation einer Grundwasser- und einer Sperrwasserpumpe zum Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren Strangs der Kernkühlung. Schließlich umfassen die Nachrüstungen dieser Revision den Aufbau eines erdbebensicheren, aus dem Notstandssystem versorgten Kühlsystems für das Brennelementlagerbecken.

Das Projekt AUTANOVE beinhaltet eine erhebliche Umgestaltung der Notstromversorgung des KKB (axpo 2011b, 2011e). Die Errichtung wurde im Jahr 2015 begonnen und bis 2016 für beide Blöcke abgeschlossen. In zwei räumlich weit voneinander getrennten Gebäuden wurden jeweils zwei seismisch qualifizierte 100%-Notstromdieselgeneratoren installiert. Pro Gebäude ist jeweils ein Strang einem Block zugeordnet, sodass jeder Block mit AUTANOVE über insgesamt zwei 100 %ige und räumlich getrennte Notstromversorgungen verfügt. Während sich im Untergeschoß der Gebäude jeweils Öltanks zur Überbrückung von 7 Tagen befinden, sind die Notstromdiesel im

Erdgeschoß mit den zugehörigen Schaltanlagen im ersten Stock untergebracht. Die Ausführung der AUTANOVE Gebäude soll nach Betreiberangaben erdbebensicher, überflutungssicher und gegen Trümmerwirkung geschützt sein. Je eine seismisch qualifizierte Notstromschiene pro Block versorgt die sicherheitstechnisch relevanten Verbraucher eines Sicherheitsstranges (Abfahrpfad 1).

### 3.4. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

Hinsichtlich möglicher Auswirkungen von Erdbeben sind gemäß (UVEK 2009) für die schweizerischen Anlagen Bodenerschütterungen, Bodensetzungen, Erdbeben, Zerstörung in der Nähe befindlicher Anlagen, welche die Sicherheit der Kernanlage gefährden können und Verlust von nicht erdbebenfesten Hilfs- und Versorgungssystemen, Brand und Überflutung zu berücksichtigen.

#### 3.4.1. Vorgaben zum Erdbebennachweis

(ENSI 2014e) konkretisiert (UVEK 2009) hinsichtlich der methodischen Anforderungen an die Führung deterministischer Nachweise für Erdbeben der Störfallkategorien 2 und 3. Danach gilt es, für Erdbeben der Störfallkategorie 3 eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}$  pro Jahr und für Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 2 von  $10^{-3}$  pro Jahr einzuhalten, wobei es sich jeweils um die Mittelwerte (Mean-Werte) handelt.

Für die Störfallanalyse sind entsprechend (ENSI 2014e) die für die Störfallbeherrschung erforderlichen Systeme, Strukturen und Komponenten (SSK) zu identifizieren. Es ist die Gesamteinwirkung aus Betrieb und Erdbeben zu berücksichtigen. Die seismisch bedingten Auswirkungen auf die SSK berücksichtigen dabei neben den Auswirkungen aus Bodenerschütterungen auch die weiteren Auswirkungen wie geologische Auswirkungen und externe Überflutung (zeitverzögert).

Der HCLPF-Wert (High Confidence of low Probability of Failure) kann gemäß (ENSI 2014e) über Fragility-Kurven (Standard FA-Methode) oder CDFM-Berechnungen ermittelt werden. Bei der CDFM-Methodik werden die effektiven Festigkeiten (effektive Bemessungswerte und die Überfestigkeit (Verfestigung)) als auch die inelastische Energieabsorption (beim Antwortspektrenverfahren über den Verhaltensbeiwert) berücksichtigt oder der Einfluss der inelastischen Energieabsorption abgeschätzt. Derart erzeugte HCLPF-Werte müssen entsprechend ( $HCLPF_{CDFM}$ ) gekennzeichnet sein. Ohne weiteren Sicherheitsfaktor ist der Nachweis erbracht, wenn  $a_{HCLPF} \geq a_{NE}$  ist, wobei  $a_{NE}$  die Beschleunigung des Nachweiserdbebens (Spitzenbeschleunigung PGA oder Spektralbeschleunigung SA) bezeichnet.

Zusätzlich zur deterministischen Analyse wird dabei auch eine probabilistische Erdbeben-Gefährdungsanalyse gefordert, wobei Gefährdungen mit einer Häufigkeit grösser gleich  $10^{-4}$  pro Jahr zu berücksichtigen und zu bewerten sind.

Bei neuen oder geänderten Gefährdungsannahmen muss der Betreiber einer Kerntechnischen Anlage in der Schweiz die deterministische Störfallanalyse und die probabilistische Sicherheitsanalyse erneuern und die Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage und insbesondere auf das Risiko bewerten. Hierbei sind die aus aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen gewonnenen historischen Daten sowie absehbare Veränderungen der maßgebenden Einflussgrößen zu berücksichtigen und zu bewerten (UVEK 2009).

Gemäß (ENSI 2016a) gilt allerdings für die Strukturen, Systeme und Komponenten, dass diese für Funktionen auf Sicherheitsebene 3 (Störfälle) nur gegen die zum Zeitpunkt ihrer Errichtung von der

Aufsichtsbehörde akzeptierten Gefährdungsannahmen durch naturbedingte und zivilisatorische Einwirkungen auszulegen oder zu schützen sind.

### 3.4.2. Aktualisierte Gefährdungsannahmen

(ENSI 2011j) hat die schweizerischen Betreiber aufgefordert, ihre mit (ENSI 2011g) angeordnete Sicherheitsüberprüfung mit Blick auf die Erdbebengefährdung auf Basis der vorliegenden Zwischenergebnisse des PRP (sogenannte PRP Intermediate Hazard, PRP-IH) abzustützen. Dazu waren die seismischen Gefährdungsannahmen auf der Grundlage des Erdbebenkataloges des schweizerischen Erdbebendienstes und der im Rahmen des PRP erhobenen Standortdaten neu zu ermitteln. Bis zum 30.11.2011 waren Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) zum 10.000 jährlichen Erdbeben zu überprüfen und einzureichen, bis zum 31.03.2012 war ein deterministischer Nachweis der Erdbebenbeherrschung vorzulegen. Nach Abschluss des PRP und Festlegung neuer Erdbebengefährdungsannahmen durch das ENSI sei der Nachweis zur Beherrschung des 10.000 jährlichen Erdbebens neu zu erbringen.

Nach (ENSI 2016i) erfolgte die ursprüngliche Erdbebenauslegung der Anlage KKB gemäß den im September 1977 gültigen Erdbebengefährdungsannahmen, nach denen auf der Felsoberfläche eine maximale Horizontalbeschleunigung von 0,12 g und eine maximale vertikale Beschleunigung von 0,08 g als Sicherheitserdbeben anzunehmen war. Nach einer Überprüfung der seismischen Gefährdungsanalysen wurden die Anfang der 1990er-Jahre errichteten Notstandssysteme für ein Sicherheitserdbeben mit einer maximalen Horizontalbeschleunigung von 0,15 g und einer maximalen vertikalen Beschleunigung von 0,10 g ausgelegt. Darüber hinaus wurden einige Anlagenteile requalifiziert.

In (ENSI 2016i) wird zusammenfassend festgehalten, dass die Sicherheitsgebäude für horizontale Bodenbeschleunigungen auf dem Niveau der Fundamentplatten von 0,15 g (SSE) ausgelegt bzw. requalifiziert sind. Die übrigen Gebäude der BK I sind für Bodenbeschleunigungen von 0,15 g bis 0,21 g (horizontal) berechnet. Eine Zuordnung zu den einzelnen Gebäuden des KKB gibt Tabelle 3-1.

**Tabelle 3-1: Erdbebenauslegung bzw. –requalifikation der BK-I-Gebäude des KKB (Beschleunigungen am Fundament)**

Gebäudebezeichnung	maximale horizontale Bodenbeschleunigung in x-Richtung	maximale horizontale Bodenbeschleunigung in y-Richtung	maximale vertikale Bodenbeschleunigung in z-Richtung
Sicherheitsgebäude mit Stahl-druckschale und innerer Betonkonstruktion	0,15 g	0,15 g	0,10 g
Nebengebäude	0,21 g	0,20 g	0,15 g
Notstandgebäude mit Filtergebäude	0,21 g	0,20 g	0,15 g
Notspeisewasser- und BOTA-Gebäude	0,21 g	0,20 g	0,15 g
Maschinenhaus Ost	0,19 g	0,18 g	0,13 g
Notstandbrunnen und Versorgungskanal UV 150	0,15 g	0,15 g	0,10 g
Rückstandslager	0,21 g	0,20 g	0,15 g

Quelle: (ENSI 2016i, Tabelle 5.3-2)

Die Ergebnisse der Pegasos Studie stellten mit einer horizontalen Beschleunigung von  $\sim 0,42$  g für Beznau an der Geländeoberfläche eine erhebliche Verschärfung der Erdbebengefährdungsannahmen dar. Die hohen Werte für alle Schweizer KKW-Standorte führten dazu, dass man sich auf eine Verfeinerung der Pegasos-Studie mit dem Pegasos Refinement Projekt PRP einigte, um die Unsicherheiten zu reduzieren (Nagra 2004).

Die von der damaligen HSK (heute ENSI) nach den Ergebnissen von Pegasos neu vorgegebenen Erdbebengefährdungskurven entsprachen den Pegasos-Gefährdungskurven mit um 20% reduzierten Bodenbeschleunigungen. Die Reduzierung wurde damit begründet, dass zu erwarten sei, dass sich zumindest ein Teil der im Rahmen von PRP zu identifizierenden Verfeinerungsmöglichkeiten umsetzen lassen würde, zudem sei Pegasos noch in der wissenschaftlichen Diskussion (HSK 2007).

Die von der HSK festgelegte Verschärfung der Erdbebengefährdungsannahmen bedeutete für den Standort Beznau, dass die bei einer jährlichen Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}$  anzunehmende Bodenbeschleunigung von bisher 0,21 g auf neu  $\approx 0,34$  g (von  $\sim 0,42$  g um 20 % reduziert) anstieg.

Ursprünglich sollten die im Rahmen des Pegasos Refinement Project (PRP) vorgenommenen Untersuchungen zu einer Neufestlegung der Erdbebengefährdungskurven 2012 abgeschlossen sein. Das ENSI erwartete, dass das zukünftig zu Grunde zu legende Gefährdungspotenzial höher liege und somit die Auslegungsanforderungen nach dem Abschluss des PRP höher sein werden als die aktuelle Auslegung der Anlage.

Die im Jahr 2012 von den Betreibern vorgelegten neuen Nachweise für das 10.000 jährliche Sicherheitserdbeben beruhten dabei nach Angaben in (ENSI 2013a) auf den damals aktuellen Gefährdungsannahmen aus dem PRP Intermediate Hazard. Berechnungen erfolgten auf Basis der Resultate der Abminderungsmodellierung. Die maximale Horizontalbeschleunigung für ein 10.000-jährliches Erdbeben lag gemäß dieser Neubestimmung (PRP-IH) bei ca. 0,35 g (ENSI 2016i).

Für den Übergang vom Felshorizont zur Geländeoberfläche zeigten die Vergleichsrechnungen eines ENSI-Experten gemäß (ENSI 2012e) eine deutliche Überhöhung der Bodenbewegungen durch die Bodenschicht, insbesondere im Bereich zwischen 10 bis 20 Hz, wo das Lockergestein die Felterschütterungen bis hin zur Geländeoberfläche um den Faktor drei verstärkt habe. Aufgrund dieser Vergleichsrechnungen erachtete das ENSI die PRP-IH-Spektren des Betreibers an der Geländeoberfläche im kleineren Frequenzbereich bis ca. 10 Hz als konservativ, im höheren Frequenzbereich als qualitativ übereinstimmend in der Übertragung durch den Baugrund. Das ENSI kam zum Schluss, dass sowohl die ausgewiesenen Baugrundeigenschaften zur Berechnung der Boden-Bauwerks-Interaktion als auch die Antwortspektren an der Geländeoberfläche als Referenzspektren für die Erdbebennachweise geeignet seien.

In seiner Stellungnahme (ENSI 2012f) zum Stresstestbericht des Betreibers weist die Aufsichtsbehörde darauf hin, dass die - basierend auf den Zwischenergebnissen der PRP-Studie vom Genehmigungsinhaber angeforderten Sicherheitsnachweise übermittelt und vom ENSI geprüft wurden und attestiert der Anlage Beznau auf Basis der aktuell gültigen Gefährdungsannahmen die Beherrschung aller analysierten Störfälle. Allerdings waren die von Axpo für die Sicherheitseinrichtungen ausgewiesenen Erdbebenfestigkeitswerte (Fragilities) nicht überprüft worden. Eine abschließende Bewertung der Erdbebensicherheit sei erst nach Vorliegen des bis zum 31. März 2012 neu zu erbringenden deterministischen Erdbebennachweises möglich.

Die Stellungnahme (ENSI 2012e) zum deterministischen Nachweis des KKB zur Beherrschung des 10.000 jährlichen Erdbebens beurteilte die Vorgehensweise und die Ergebnisse zu den PRP-IH Gefährdungsannahmen des Betreibers als bis zum Vorliegen der PRP-Ergebnisse ausreichend und behielt sich vor, nach Abschluss der PRP-Studie neue Gefährdungsannahmen festzulegen und entsprechende Erdbebennachweise führen zu lassen.

Gemäß (ENSI 2014d) wurden im Rahmen der Überprüfung der Erdbebensicherheit auch sekundäre Effekte wie induzierte Überflutungen oder Feuer im erforderlichen Umfang mit berücksichtigt (ENSREG 3.1.2, PP1).

Hinsichtlich sekundärer Effekte wurden gemäß (ENSI 2016i) vom Betreiber Ende 2014 im Rahmen der PSÜ zusätzliche Unterlagen vorgelegt. Demnach seien Bodenverflüssigungen und seismisch induzierte Setzungen für die Anlage nicht relevant. Erdbeben seien nicht explizit untersucht worden, aufgrund der Entfernung von der Anlage bzw. geringer Hangneigung jedoch nicht relevant für die Anlage. Während das ENSI die Angaben des Betreibers zu Bodenverflüssigungen und Setzungen als plausibel akzeptiert, fordert das ENSI bis zum 15. Dezember 2017 die Einreichung einer aktuellen Hanganalyse für den Hang westlich der Anlage Beznau, die auch die Möglichkeit eines Rückstaus bzw. einer Umleitung der Aare und damit einer potentiellen Überflutung des Kraftwerkgeländes berücksichtigt (ENSI 2016i, Forderung 2.1-1).

Bereits (ENSI 2013a) verweist auf einen Bericht der Eidgenössischen Kommission für Nukleare Sicherheit zu Fukushima, wonach das PRP zeitnah zum Abschluss zu bringen und in Form neuer Erdbebengefährdungsannahmen für die schweizerischen Kernkraftwerke umzusetzen sei. ENSI ging hierbei von einem Abschluss der Untersuchungen durch die Betreiber im Jahr 2013 aus. Bis Ende 2013 sollte das methodische und terminliche Vorgehen zur Festlegung neuer Gefährdungsannahmen auf Basis der Ergebnisse des PRP abgeschlossen sein. Wesentliche

methodische Weiterentwicklungen betreffen bspw. die messtechnischen Registrierungen zur Erdbebenhäufigkeit in den seismischen Quellgebieten sowie die Kenntnisse zu Falten und Verwerfungen im Untergrund als potenziellen Erdbebenherden, die unterschiedlichen Übertragungs- bzw. Abminderungsverläufe der Erdbebenbeschleunigungen beim Durchwandern der neu untersuchten Bodenschichten, die auf neuestem Stand berücksichtigt wurden – auch unter Beachtung neotektonischer und paläoseismischer Aspekte.

Nach (ENSI 2014a) wurde das PRP durch swissnuclear Ende 2013 abgeschlossen und die Ergebnisse wurden dem ENSI zur Überprüfung eingereicht. Gemäß (ENSI 2015a) sollte in 2015 eine endgültige Beurteilung der Ergebnisse des PRP erfolgen und auf dieser Basis neue Gefährdungsannahmen für alle schweizerischen KKW erlassen werden.

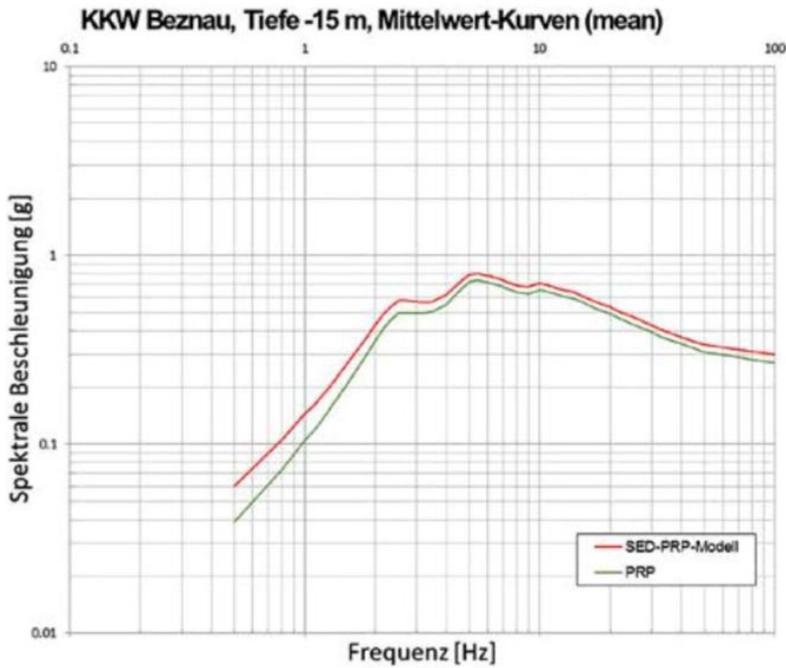
Mit (ENSI 2015c) legte das ENSI ihren abschließenden Bericht zum PRP vor. Darin kam ENSI bei der Prüfung zum Schluss, dass das PRP zu wesentlichen neuen Forschungsergebnissen geführt habe. Die vertieften und weiterentwickelten Arbeiten zu den Abminderungsmodellen der Erschütterungsausbreitung (Teilprojekt 2) und den Standorteinflüssen des Bodenuntergrunds (Teilprojekt 3) wurden vom ENSI nach eigener Aussage ebenso geprüft wie die Ergebnisse zur Gefährdungsberechnung (Teilprojekt 4) und gemäß ENSI auf angemessene Weise bearbeitet. Der Software-Einsatz soll der vom ENSI genehmigten Planung entsprochen haben.

Allerdings bestanden hinsichtlich der Charakterisierung der seismischen Quellen im Teilgebiet 1 Vorbehalte, so dass auch das hierauf aufbauende Gesamtergebnis nicht als ausreichend angesehen wurde (ENSI 2016f). Ursächlich war die zwischenzeitlich erfolgte Aktualisierung des verwendeten Schweizer Erdbebenkatalogs vom Jahr 2002 auf das Jahr 2009, die vom Schweizer Erdbebendienst SED aufgrund neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse vorgenommen wurde. Im Projekt PRP wurde dies offenbar nicht mehr ausreichend berücksichtigt. Auch wenn man zum Schluss kam, dass sich hinsichtlich der Quellzonierung keine Änderung ergab, hätte aber die jeder Quellzone zugewiesene Magnituden-Häufigkeits-Beziehung den aktualisierten Daten angepasst werden müssen. Weiterhin war auch die Neubeurteilung der in den Quellen zu erwartenden maximalen Erdbeben-Magnituden erforderlich. Als man erkannte, dass sich dieser Einfluss auf die Gefährdungsergebnisse als unerwartet groß erwies, war eine erneute Expertenbefragung offenbar nicht mehr möglich (ENSI 2016f).

Deshalb ließ das ENSI die Quellzonencharakterisierung des Teilprojekts 1 durch den SED vollständig an die Aktualisierung des Schweizer Erdbebenkatalogs anpassen und auf dieser Basis die Berechnungen der Teilprojekte 2 bis 4 des PRPs zur Ermittlung aktualisierter Erdbebengefährdungsannahmen erneut durchführen (ENSI 2016j). Die Gefährdungsergebnisse dieses PRP-SED-Modells liegen generell höher als diejenigen des PRP und wurden in (ENSI 2016j) als gültige Gefährdungsannahmen (Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015, PRP-SED) erlassen.

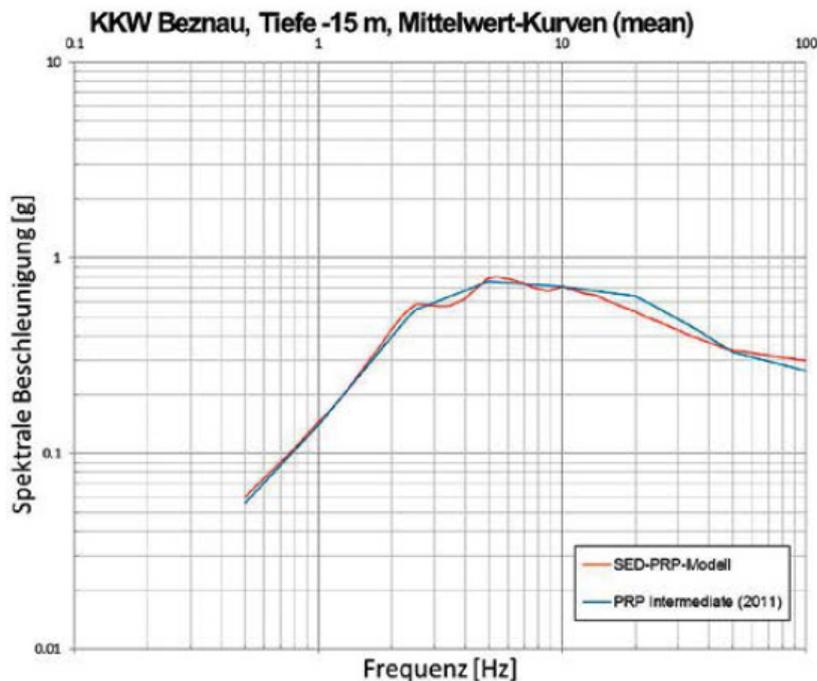
Ein Dokument zu den offiziellen Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015 liegt uns nicht vor. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Gefährdungsannahmen den Angaben in (ENSI 2016d) entsprechen, die hierin als die ENSI-hybrid-model-hazard-figures veröffentlicht sind. Numerische Ergebnisse zu den logarithmischen Darstellungen der PGA sind in diesen Dokumenten nicht enthalten. Der SED hat allerdings in (SED & ETH 2016) den nachfolgend dargestellten Vergleich zwischen PRP und PRP-SED für die Bodenantwortspektren an der Fundamentunterkante des Reaktorgebäudes (Rgf) in -15m Tiefe (Mittelwert) in nachfolgender Abbildung 3-6 dargestellt.

**Abbildung 3-6: Vergleich der Bodenantwortspektren (horizontale Komponente) von PRP und PRP-SED bei Fundamentniveau -15m für eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}/a$  (Mittelwert)**



Quelle: (SED & ETH 2016)

**Abbildung 3-7: Vergleich der Bodenantwortspektren (horizontale Komponente) von PRP-IH und PRP-SED bei Fundamentniveau -15m für eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}/a$  (Mittelwert)**

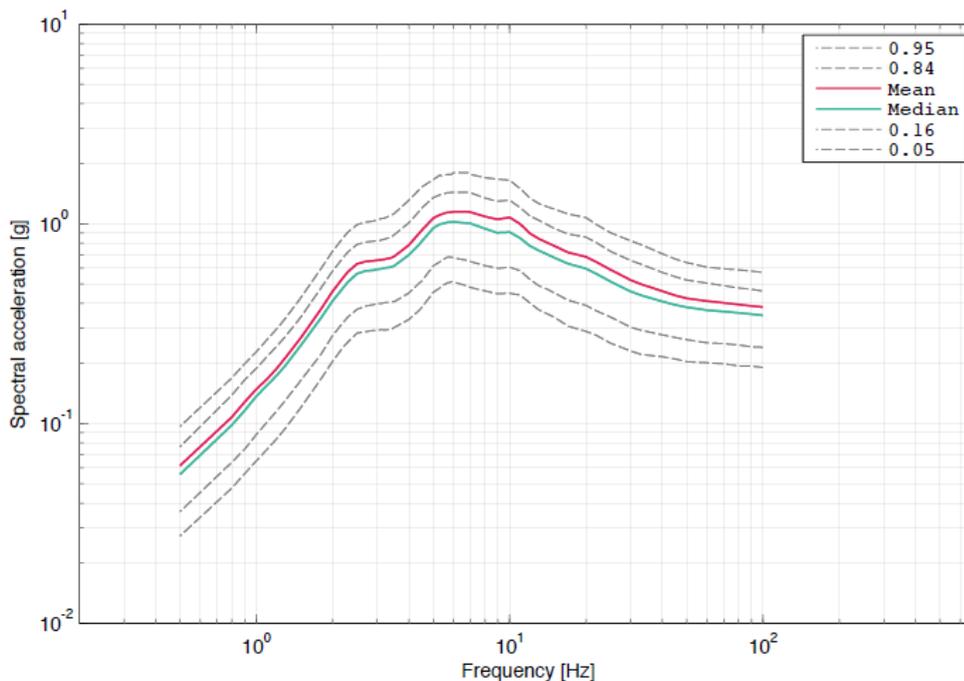


Quelle: (ENSI 2016f)

Für den PGA-Wert ergibt sich danach  $PGA_{Rgf} \sim 0,3 \text{ g}$  für eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}/a$ . Der gleiche Wert ist auch dem Vergleich zwischen den PRP-SED Ergebnissen und den Ergebnissen des PRP-IH in Abbildung 3-7 aus (ENSI 2016f) zu entnehmen.

Der entsprechende Wert für die Geländeoberfläche und eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}/a$  ergibt sich nach Abbildung 3-8 mit  $PGA \sim 0,39 \text{ g}$ .

**Abbildung 3-8: PRP-SED Bodenantwortspektren (horizontale Komponente) an der Geländeoberfläche für eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}/a$**



Quelle: (ENSI 2016d)

### 3.4.3. Fragility-Analysen

In (ENSI 2012a) verweist das ENSI darauf, dass bis zum 30.06.2012 eine Prüfung der von den Betreibern vorzulegenden Fragilityanalysen und Anlagennachweise zum 10.000 jährlichen Erdbeben erfolgen sollte.

Nach (ENSI 2015a) lagen den Nachweisen der Betreiber für das 10.000 jährliche Erdbeben die Gefährdungsannahmen gemäß den Ergebnissen des PRP-IH zugrunde. Als Sicherheitsmarge der einzelnen Abfahrpfade wurde das Verhältnis der jeweiligen seismischen Kapazität der betrachteten Einheit (von der einzelnen Komponente bis hin zur Gesamtanlage) zur maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung (Peak Ground Acceleration, PGA) definiert. Nach einer Grobprüfung der eingereichten Unterlagen wurden vom ENSI Nachforderungen erhoben, so dass die ursprünglich geplante Detailprüfung noch nicht abgeschlossen war. Eine Bewertung der Ergebnisse der Analysen der Anlage KKB wurde für das erste Quartal 2015 angekündigt.

Die periodische Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) von 2012 des KKB beinhaltet auch die Erdbebenanalyse „Beznau Risk Assessment (BERA) - Power Operation and Hot Shutdown, December 2013“, im Weiteren als BERA-2013 bezeichnet, die eine Weiterentwicklung der BERA 2009 darstellt, uns aber nicht vorliegt. Informationen hierzu finden sich jedoch in (ENSI 2016i).

Der Erdbebenanalyse BERA-2013 wurden – anders als bei BERA-2009 – die damals geltenden verschärften PRP-IH Gefährdungsannahmen zugrunde gelegt. Es wurden neue Fragilityanalysen gemäß EPRI-Verfahren für die Komponenten und Baustrukturen durchgeführt, wobei die Festlegung der Parameterwerte auf Basis der Experten-Einschätzungen anlässlich mehrerer Anlagenbegehungen erfolgte. Zudem wurden Unfallsequenzen analysiert, wobei der Bereich der auf eine Tiefe von 15 m bezogenen Bodenbeschleunigung mit dem Intervall größter Beschleunigungen solche bis 2,8 g abdeckte.

In seiner Stellungnahme (ENSI 2016i) zur periodischen Sicherheitsüberprüfung stellt ENSI zur Robustheit gegenüber Erdbeben fest, dass Möglichkeit und Auswirkungen eines Baugrundversagens analysiert seien und die Fragilityanalysen von 2009 aufdatiert worden seien. Gemäß ENSI gelten die in den Fragilityanalysen der BERA-2013 verwendeten Ansätze als Stand der Technik. Die Vernachlässigung von Erdbeben mit Beschleunigungen grösser als 2,8 g habe nur einen geringen Einfluss auf die CDF des KKB, da solche Beschleunigungen nur mit einer Häufigkeit von  $10^{-8}$  pro Jahr oder seltener überschritten würden.

Allerdings habe ENSI zu einzelnen Punkten der Erdbebenanalyse Verbesserungspotenzial aufgezeigt, was vor allem die Fragilityanalysen sowie deren Implementierung in das Modell betreffe. Die Fragilityanalysen konnten demnach bei einer stichprobenartigen Untersuchung/Überprüfung durch ENSI teilweise nicht nachvollzogen werden. Die Dominanz von seismisch direkt oder indirekt bedingten Ausfällen der Gleichstromversorgung sei insbesondere auf die relativ geringe seismische Robustheit der Gleichstromschienen der Altanlage sowie der Nebengebäude mit Komponenten der Gleichstromversorgung der Altanlage, zurückzuführen. Allerdings konnten auch die Fragilitywerte der fraglichen Gleichstromschienen von ENSI nicht nachvollzogen werden.

Die durch Erdbeben verursachte Kernschadenshäufigkeit (CDF) wird in der BERA-2013 gemäß ENSI mit  $CDF = 7,72 \cdot 10^{-6}/a$  angegeben, was einem Anteil von ungefähr 83% an der Gesamt-CDF von  $9,35 \cdot 10^{-6}/a$  entspreche. Dominierend seien seismisch bedingte Ausfälle der Gleichstromversorgung. Erdbeben mit Beschleunigungen im Bereich von 0,55 g bis 1,5 g sollen nach BERA-2013 mit etwa 91% zur seismisch bedingten CDF beitragen.

Im Ergebnis geht (ENSI 2016i) davon aus, dass das KKB das Kriterium der Gefährdungsannahmenverordnung ( $CDF < 10^{-4}$  pro Jahr) deutlich einhalte, trotz des identifizierten Verbesserungspotenzials. Allerdings ergäbe sich möglicherweise eine Gesamt-CDF des KKB von grösser  $10^{-5}/a$ . Aufgrund des hohen Beitrags der Erdbebengefährdung zur Gesamtgefährdung fordert ENSI (ENSI 2016i):

*„Bis zum 28. Juni 2019 ist die Ausgewogenheit der Risikobeiträge bezüglich der Ereigniskategorie Erdbeben basierend auf den Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015 zu beurteilen. Falls Erdbeben mehr als 60 % zur mittleren CDF beitragen und der Beitrag grösser als  $6 \cdot 10^{-6}$  pro Jahr ist, sind Massnahmen zur Reduktion des CDF-Beitrags der Ereigniskategorie Erdbeben zu identifizieren und zu überprüfen, ob deren Umsetzung als angemessen zu beurteilen ist.“*

ENSI führt die Senkung der aktuellen CDF von  $9,35 \cdot 10^{-6}/a$  in BERA-2013 im Vergleich zur vorhergehenden Studie BERA-2009 um etwa 45% insbesondere auf die im Modell bereits abgebildete verbesserte Energieversorgung durch das Projekt AUTANOVE zurück.

Gegenüber der Studie BERA-2000 ist die CDF in BERA-2013 gestiegen. Dies ist hauptsächlich durch den Anstieg des seismischen Anteils der CDF bedingt, welcher aufgrund der neu bestimmten Erdbebengefährdung von  $1,36 \cdot 10^{-6}$  pro Jahr auf  $7,72 \cdot 10^{-6}$  pro Jahr zunahm.

### 3.5. Auflagen und Nachrüstungen

In (ENSI 2012a) verweist das ENSI darauf, dass bis zum 30.06.2012 eine Prüfung der von den Betreibern vorzulegenden Anlagennachweise zum 10.000 jährlichen Erdbeben erfolgen sollte. Weiterhin erfolge in der Anlage Beznau eine Ertüchtigung der Kühlsysteme und Gebäude der BE-Lagerbecken. Für den Fall von auslegungsüberschreitenden Erdbeben mit Leckagen innerhalb des Primärcontainments sei weiterhin bis zum 30.09.2012 eine Überprüfung der seismischen Robustheit der Isolation des Primärkreislaufs und des Reaktor-Containments erforderlich.

Gemäß (ENSI 2013a) wurden im März 2012 fristgerecht Nachweise der Beherrschung des 10.000 jährlichen Erdbebens sowie zu einer Überlagerung von Erdbeben und Hochwasser eingereicht. Das ENSI stellt fest, dass sowohl die Kernkühlung wie die Brennelement-Lagerbeckenkühlung einzelfehlersicher gewährleistet sind. Die Anlagen können in einen sicheren Zustand überführt und dort über 72 Stunden gehalten werden. Einzelne Nachforderungen werden im Rahmen aufsichtlicher Vorgänge weiterverfolgt.

Mit (ENSI 2016j) hat die Aufsichtsbehörde die aus dem PRP-SED für die Anlage KKB resultierenden neuen „Erdbebengefährdungsannahmen 2015“ erlassen. Die Anlage KKB hat demnach bis zum 21.12.2018 den mit (ENSI 2011j) verfügten Nachweis „Erdbeben“ sowie die „Kombination Erdbeben und Hochwasser“ auf Basis dieser Gefährdungsannahmen für den Anlagenzustand Leistungsbetrieb erneut zu führen. Dazu sind ebenfalls bis zu diesem Zeitpunkt aktualisierte Etagenantwortspektren einzureichen. Zum 30.09.2020 hat der Betreiber eine deterministische Störfallanalyse für die Störfallkategorien 2 und 3 zu führen. Bis zum 28.06.2019 ist weiterhin die probabilistische Sicherheitsanalyse zum Erdbeben zu aktualisieren.

Weiterhin hat ENSI im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung (ENSI 2016i) festgestellt, dass sich seit der Errichtung der Anlage Beznau die für Bautechnik relevanten Normen weiterentwickelt haben, dies jedoch bislang von KKB nicht in angemessenem Maße berücksichtigt worden sei. Das ENSI hat daher eine diesbezügliche Forderung 5.2-1 erlassen, wonach für die Sicherheitsbeurteilung der Bauwerke der BK I und BK II die aktuellen Tragwerksnormen maßgebend sind. Das KKB hat dazu bis zum 15.12.2017 nachzuweisen, dass die Tragsicherheit der Bauwerke auch bei Anwendung der aktuellen Normen und der Berücksichtigung aktualisierter Einwirkungen erfüllt wird. Dabei fordert das ENSI nicht zwingend die Durchführung von neuen statischen und dynamischen Berechnungen. Der Nachweis kann auch qualitativ erfolgen, das heißt ohne neue Berechnungen unter Verwendung bisheriger Berechnungsergebnisse mit zugehörigen Beurteilungen und Bewertungen.

Die Nachweise zur Überprüfung der seismischen Robustheit der Isolation des Primärkreislaufs und des Reaktor-Containments wurden nach (ENSI 2013a) vom Betreiber der Anlage KKB fristgerecht eingereicht. Der Betreiber kam darin zum Schluss, dass die Integrität des Primärkreislaufs und des Containments gewährleistet ist. Für das KKB bestätigt ENSI die ausreichende Robustheit der Isolation des Primärkreislaufs und des Reaktor-Containments auf Basis der Gefährdungsannahmen des PRP Intermediate Hazard. In diesem Zusammenhang wurden im Primären Zwischenkühlsystem die Halterungen der Isolationsventile bei den Reaktorhauptpumpen während der Revisionen 2011 und 2012 ertüchtigt (ENSI 2016i).

In (ENSI 2013a) wird der Aspekt der vorgelagerten automatischen Schnellabschaltung hervorgehoben, wie er in den japanischen Kernkraftwerken implementiert ist und der sich bei dem Ereignis in Fukushima als positiv herausgestellt hat. Durch eine frühzeitige Abschaltung des Reaktors vor Eintreffen der für eine Anlage relevanten Erdbebenwellen kann das Risiko reduziert werden, dass die relevanten Komponenten der Anlage während der Schnellabschaltung Belastungen aus dem Erdbeben ausgesetzt sind. Allerdings steht dem gegenüber, dass sich durch

ein System zur automatischen Schnellabschaltung auch das Risiko für fehlerhaft ausgelöste Schnellabschaltungen erhöht.

Das ENSI hat 2013 hierzu eine Arbeitsgruppe eingesetzt, die die Vor- und Nachteile der Einführung einer solchen automatischen Schnellabschaltung auch in den schweizerischen Anlagen überprüfen soll. Nach (ENSI 2014a) wurden der internationale Stand von Wissenschaft und Technik zu Erdbebenfrühwarnsystemen erhoben sowie internationale Erfahrungen zum Einsatz der Erdbebeninstrumentierung eines Kernkraftwerks zur automatischen Schnellabschaltung gesammelt, ein zusammenfassender Bericht wurde für 2014 erwartet. Gemäß (ENSI 2015a) greifen international vorhandene automatische Schnellabschaltsysteme auf on-site Erdbebenmesssysteme zurück, off-site Erdbebenmessungen werden demgegenüber nicht zur Auslösung einer automatischen Schnellabschaltung eingesetzt. Eine automatische Schnellabschaltung ist jedoch nur in Regionen mit hoher Erdbeben­tätigkeit implementiert.

Auf Basis einer deterministischen und probabilistischen Bewertung der Risikoreduktion durch eine automatische Schnellabschaltung kommt ENSI in (ENSI 2015a) zu dem Schluss, dass eine derartige Nachrüstung für die schweizerischen Anlagen nicht erforderlich ist. (ENSREG 2015) sieht diese Einschätzung als gerechtfertigt an.

(ENSI 2015i) beschreibt die Sicherheitsmargenuntersuchungen für externe Ereignisse im Rahmen des Projektes ERSIM, wobei hier insbesondere Erdbeben aufgrund seines ihres Anteils am Gesamtrisiko betrachtet wurden. Hierbei wurden Abfahrpfade definiert, mit denen die KKW nach dem Störfall Erdbeben in einen sicheren Zustand überführt und gehalten werden sollen. Für jeden dieser Abfahrpfade seien die Sicherheitsmargen ausgewiesen worden, allerdings finden sich keine konkreten Angaben hierzu in (ENSI 2015i). Erstmals wurde auch das AUTANOVE in die Analyse einbezogen. Die Sicherheitsmargen wurden noch auf Basis der PRP-IH Gefährdungsannahmen bestimmt.

Nach Bewertung des ENSI verfügt das KKB über zwei seismisch robuste Abfahrpfade, mit denen die Anlage in den Zustand „heiss abgestellt“ überführt und langfristig gehalten werden kann. Der als der „*seismisch robuste*“ eingestufte Abfahrpfad 2 (speziell geschützte Notstandssysteme) besitze eine relativ hohe Sicherheitsmarge, sodass auch deutlich schwerere Erdbeben als in der Analyse unterstellt noch beherrscht werden.

Da in der eingereichten Sicherheitsmargenanalyse entgegen der Vorgabe des ENSI nur der Zustand „heiß abgestellt“ untersucht wurde, forderte das ENSI eine Erweiterung der Analyse auf den Zustand „kalt abgestellt“ bis 31. Dezember 2015 (ENSI 2015i). Hierbei sollten auch die mit dem Nachrüstprojekt AUTANOVE erzielten Verbesserungen berücksichtigt und ggf. weitere mögliche Verbesserungsmaßnahmen aufgezeigt werden.

Bezüglich der seismischen Robustheit des Abfahrpfades 3 (Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes) habe das ENSI mehrere offene Punkte identifiziert, welche die Durchführbarkeit der Maßnahmen betreffen. Vor dem Hintergrund, dass zwei seismisch robuste Abfahrpfade im KKB zur Verfügung stehen, will das ENSI diese Punkte in die laufende periodische Sicherheitsüberprüfung aufnehmen.

Die Kühlung der Brennelemente in den Lagerbecken soll unter Berücksichtigung des Nachrüstprojektes NABELA ebenfalls über zwei seismisch robuste Abfahrpfade sichergestellt sein, deren Sicherheitsmarge allerdings durch die seismische Robustheit des Nebengebäudes A begrenzt ist, deren seismische Verstärkung derzeit durchgeführt werde. Im Hinblick auf den erforderlichen Erhalt der Brennelementbeckenintegrität forderte das ENSI mit Forderung 2 in

(ENSI 2015i) eine konkretere Analyse der Auswirkungen eines Versagens des Portalkrans auf dem Brennelementbeckengebäude bis zum 30. Juni 2015.

Nach (ENSI 2016i) wurde das Projekt AUTANOVE für den Block 2 des KKB in 2015 mit einem abschließenden Funktionstest abgeschlossen. Für Block 1 sei geplant, die Integration in 2016 abzuschließen. Im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde demnach die bisherige Notstromversorgung durch die insgesamt zwei Flutdiesel sowie das hydraulische Kraftwerk Beznau durch zwei Dieselgeneratorgruppen für jeden Block des KKB ersetzt. Die Dieselgeneratorgruppen sind seismisch qualifiziert und gegen Überflutung geschützt in zwei neu errichteten Gebäuden aufgestellt. Weiterhin wurde je eine Notstromschiene pro Block aufgebaut, von der die sicherheitstechnisch relevanten Verbraucher eines Sicherheitsstranges versorgt werden. Auch die Versorgung der Notspeisewasserpumpe erfolgt nun durch die geschützte, neue Notstromschiene. Damit verfügen beide Blöcke im Falle eines Erdbebens über eine zum Notstand-Speisewassersystem vollwertige Redundanz zur Sicherstellung der sekundärseitigen Nachwärmeabfuhr.

Weiterhin wurde eine seismisch qualifizierte Nachspeisung der Notspeisewassertanks aus einem Grundwasserbrunnen errichtet. Somit kann der Notspeisewasser-Tank seismisch gesichert automatisch mit Wasser aus dem Notstandbrunnen nachgespeist werden. Weiterhin wurde eine zusätzliche, seismisch qualifizierte Sperrwasserpumpe, die aus dem Notstand-Reaktorschutz angesteuert wird und über die neu aufgebaute Notstromschiene elektrisch versorgt wird, errichtet (ENSI 2016i). Damit soll insbesondere die Vorsorge gegen einen seismisch induzierten Kühlmittelverlust an den Reaktor-Hauptpumpen verbessert werden.

(ENSI 2016i) nennt weitere Einzelertüchtigungen zur Erdbebensicherheit:

- Erdbebenertüchtigung Nebengebäude A (geplant 2013/2014, durchgeführt 2015).
- Ertüchtigung BE-Lagergebäude: Ersatz einer Mauerwerkswand durch eine Betonwand und Einbau neuer Betonwände (geplant 2013/2014, durchgeführt 2014/2015).
- Anpassungen im Reaktorschutz- und -Regelsystem im Rahmen der Umsetzung der Projekte AUTANOVE (geplant 2014, durchgeführt 2015).

## 3.6. Stellungnahme

### 3.6.1. Grundausslegung der Anlage Beznau

Die im Laufe der letzten Jahre mehrfach angepassten Gefährdungsannahmen für den Standort Beznau sind in Tabelle 3-2 entsprechend (Brettner et al. 2012) aufgelistet und ergänzt um die neuen PRP- und PRP-SED-Gefährdungsannahmen. Da im Wesentlichen nur Grafiken mit logarithmischen Skalen seitens ENSI oder Swissnuclear veröffentlicht wurden, mussten zum Teil PGA-Werte anhand dieser logarithmisch skalierten Grafiken abgeschätzt werden.

**Tabelle 3-2: Gefährdungsannahmen und Robustheit des Standorts KKB**

Erdbebeneinwirkung	PGA <sub>Rgf</sub>	PGA	Max. HCLPF	Sicherheitsfaktor
Gefährdungsannahme ursprüngliche Auslegung (1969) Gefährdungsstufe H1		0,12 g <sup>1</sup>		
Gefährdungsannahme (2011) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-4</sup> /a Gefährdungsstufe H2	0,15 g <sup>1</sup>	0,21 g <sup>1</sup>	0,46 g <sup>2</sup>	2,2
Gefährdungsannahme (2011) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-5</sup> /a	~0,19 g <sup>2</sup>	~0,27 g <sup>2</sup>	0,46 g	1,7
Gefährdungsannahme Pegasos (2004) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-4</sup> /a		~0,42 g <sup>3</sup>	0,46 g	
Gefährdungsannahme Pegasos (2004) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-5</sup> /a		>0,47 g <sup>2</sup>	0,46 g	< 1
Gefährdungsannahme Pegasos-ENSI (2007), Reduzierung Pegasos um 20% Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-4</sup> /a		~0,34 g <sup>4</sup>		
Gefährdungsannahme PRP-IH (2011) Gefährdungsstufe H3		0,35 g <sup>1</sup>	0,46 g	1,3
Gefährdungsannahme Swissnuclear (2013) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-4</sup> /a	~0,255 g <sup>5</sup>	0,348 g <sup>5</sup>	n. b.	
Gefährdungsannahme PRP-SED (2016) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-4</sup> /a Gefährdungsstufe H3 aktuell	~0,3 g <sup>6</sup>	~0,39 g <sup>6</sup>	n. b.	
Gefährdungsannahme PRP-SED (2016) Überschreitungshäufigkeit 10 <sup>-5</sup> /a	~0,65 g <sup>7</sup>	~0,78 g <sup>7</sup>	n. b.	

Quelle:1(axpo 2011e);2 (Brettner et al. 2012), 3 Abbildung 3-3; 4 (HSK 2007); 5 Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5; 6 Abbildung 3-6 und Abbildung 3-8; 7 (ENSI 2016d), Fig. 2-2.12 und Fig. 2-3.12,

PGA<sub>Rgf</sub> maximale horizontale Bodenbeschleunigung auf Fundamentniveau des Reaktorgebäudes

PGA maximale horizontale Bodenbeschleunigung auf Höhe der Geländeoberfläche

Max. HCLPF: Der HCLPF Wert (High Confidence of Low Probability of Failure) ergibt den Wert der horizontalen Bodenbeschleunigung, bei dem die Versagens-Wahrscheinlichkeit der betrachtete Komponente mit einer statistischen Sicherheit von 95% kleiner als 5% ist.

Es ist davon auszugehen, dass die aktuellen Gefährdungsannahmen dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die weiteren Eingrenzungen der Unsicherheiten der Gefährdungsannahmen durch PRP und SED verstärken ihre Belastbarkeit. Gegebenenfalls resultiert jedoch aus der für die höheren Gefährdungsannahmen relevanten Aktualisierung des Erdbebenkatalogs von 2002 auf 2009 zwischenzeitlich ein erneuter Anpassungsbedarf auf Basis der seit 2009 erfolgten Erdbeben-Registrierungen.

Die Festlegungen des ENSI zu den aktuellen Gefährdungsannahmen PRP-SED des Standortes Beznau zeigen, dass die ursprünglichen PGA-Werte der ersten Pegasos-Studie fast wieder erreicht werden. Die PRP-SED Gefährdungsannahmen liegen höher, als die bisher von Axpo der Nachweisführung zugrunde gelegten Anforderungen gemäß PRP-IH.

Während in Deutschland die Grundausslegung gegen ein Erdbeben mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr gefordert ist, ist für das Sicherheitserdbeben gemäß Schweizer Regelwerk die Anforderung festgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten der zugehörigen Einwirkungen höchstens  $10^{-4}$  pro Jahr betragen soll. Wie bereits in (Brettner et al. 2012) festgestellt, ist die Höhe der ermittelten Einwirkungen methodenabhängig. Hinsichtlich der zur Ermittlung der Erdbebeneinwirkungen verwendeten Methoden gehen wir davon aus, dass die derzeit gültigen Gefährdungskurven für deutsche Anlagen diesbezüglich größere Gemeinsamkeiten mit der Gefährdungskurve aufweisen, die der noch 2011 gültigen Auslegung des KKB zu Grunde lag, als mit den im Rahmen des Projekt Pegasos bzw. des PRP bestimmten Gefährdungskurven. Da gemäß der Angaben in Tabelle 3-2 für die Anlage Beznau ausgehend von den Gefährdungsannahmen des Jahres 2011 auch noch bei einem Erdbeben mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $10^{-5}$  pro Jahr Reserven zur Beherrschung bestünden, leiten wir hieraus bezüglich der Grundausslegung der Anlage Beznau keinen bewertungsrelevanten Unterschied im Sicherheitsstatus ab. Allerdings liegt bislang kein Nachweis durch den Betreiber vor, dass auch für die aktuell gültigen Gefährdungsannahmen das SSE auslegungsgemäß beherrscht wird.

Für eine detaillierte Darstellung der auslegungsgemäß verfügbaren Pfade zur Nachwärmeabfuhr bei Erdbeben wird an dieser Stelle auf (Brettner et al. 2012, Kap. 5) verwiesen. Durch die Umsetzung des Projekts AUTANOVE steht mittlerweile in der Anlage Beznau neben einem Strang des Notstandsystems pro Block neu ein Strang des ursprünglichen Sicherheitssystems zur Verfügung.

Damit steht zur Beherrschung des SSE ausgehend vom Leistungsbetrieb im KKB gegenwärtig neben dem auslegungsgemäß vorgesehenen Notstandsystem auch ein Strang des ursprünglichen Sicherheitssystems zur Verfügung. Weiterhin ist eine gegenseitige Blockstützung möglich. Diese ist zwar nicht automatisiert und setzt Handmaßnahmen voraus, kann jedoch grundsätzlich zur Kompensation von Verfügbarkeitsbeschränkungen beispielsweise aufgrund von Instandhaltungsmaßnahmen herangezogen werden. Auch bei einer Überlagerung von Einzelfehlern und Instandhaltungsfall an bestimmten gleichartigen aktiven Komponenten der Notstandssysteme (Notstromdieselaggregate, Brunnenwasserpumpen) die zum blockübergreifenden Ausfall der entsprechenden Funktionen führen könnten, würde dies durch die verfügbaren Stränge des Sicherheitssystems nunmehr beherrscht.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich kein bewertungsrelevanter sicherheitstechnischer Vor- oder Nachteil der Anlage KKB.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand nunmehr ein Strang des ursprünglichen Sicherheitssystems zur Verfügung, sowie zwei weitere Pfade, die z. T. gemeinsame Komponenten nutzen, und mit denen ein Wassereintrag in das Primärcontainment verbunden ist, was bei geschlossenem PKL eine Öffnung desselben zur Dampf- und Wasserabgabe in das Containment erforderlich macht. Diese Fahrweisen würden in Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft, da die Nachkühlketten gegen Erdbeben ausgelegt sind und somit keine Erfordernis für eine derartige Fahrweise besteht. Insbesondere für die Beherrschung des SSE ausgehend vom Stillstand steht damit in der Anlage KKB eine geringere Anzahl an Strängen in der Qualität eines

Sicherheitssysteme zur Verfügung als in den deutschen Anlagen. Dies wird auch durch die Forderung des ENSI unterstrichen, die Untersuchung der Sicherheitsmargen nicht nur auf den Zustand „heiß abgestellt“ zu beschränken, sondern auch den Zustand „kalt abgestellt“ zu analysieren.

Bezüglich der Möglichkeiten zur Beckenkühlung beim Bemessungserdbeben wird an dieser Stelle auf die Bewertung in Kap 5.5 verwiesen.

Eine automatische Schnellabschaltung der Reaktoranlage bei Erdbeben, so wie sie weltweit in einzelnen Anlagen realisiert ist, ist aufgrund der damit verbundenen Risikoabwägung der Vor- und Nachteile einer solchen Automatik weder in den schweizerischen noch in den deutschen Anlagen implementiert. Daraus ergibt sich somit kein bewertungsrelevanter Unterschied.

Insgesamt entspricht die Grundausslegung der Anlage Beznau aufgrund der offenen Nachweise zur Beherrschung des aktuell gültigen Bemessungserdbebens und den Einschränkungen bei den zur Beherrschung des Bemessungserdbebens zur Verfügung stehenden Sicherheitssystemen nicht dem Sicherheitsstatus deutscher Anlagen, was einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage Beznau darstellt.

### 3.6.2. Sicherheitsmargen

Da bei der ursprünglichen Auslegung der Systeme, Strukturen und Komponenten gegen das Sicherheitserdbeben in der Regel Konservativitäten und Sicherheitszuschläge berücksichtigt wurden, bestehen ggfs. noch Sicherheitsmargen, die es zu bewerten gilt, um eine Aussage zur Robustheit der Anlage zu machen. Der HCLPF Wert (High Confidence of Low Probability of Failure) gibt den Wert der horizontalen Bodenbeschleunigung an, bei dem die Wahrscheinlichkeit für das Versagen der betrachteten Komponente mit einer statistischen Sicherheit von 95% kleiner als 5% ist, siehe hierzu auch (Brettner et al. 2012). Basis für eine Robustheitsbewertung sind damit die Ergebnisse der Fragility-Analyse.

Die Betreiber deutscher Kernkraftwerke wurden gemäß (BMUB 2016, N-13) zur Überprüfung ihrer Sicherheitsreserven aufgefordert:

*„Zur Absicherung der vitalen Sicherheitsfunktionen bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen von außen oder innen sollte eine systematische Analyse durchgeführt werden.“*

*Dazu sind die Auslegungsreserven in den vorhandenen Sicherheits- oder Notstandseinrichtungen dahingehend zu bewerten, ob und ab wann bei erhöhten (auslegungsüberschreitenden) Annahmen zu externen und internen Einwirkungen die benötigte Sicherheitsfunktion gefährdet sein kann. Hierzu sind die Kriterien aus der RSK Sicherheitsüberprüfung für mindestens Robustheitslevel 1 [...] heranzuziehen.*

*Auf dieser Basis ist zu bewerten, ob eine Erhöhung der Robustheit durch angemessene Maßnahmen zur Ertüchtigung vorhandener Sicherheits- oder Notstandseinrichtungen oder durch vorhandene oder zusätzliche Notfallmaßnahmen möglich ist.“*

Spezifisch für Erdbeben wurde gefordert (BMUB 2016, N-14)

*„Die Robustheit gegenüber auslegungsüberschreitenden Erdbebeneinwirkungen soll bewertet werden. Hierzu sind die Kriterien aus der RSK Sicherheitsüberprüfung für mindestens Robustheitslevel 1 heranzuziehen. Für Anlagen mit Erdbeben-PSA sollen dafür die HCLPF-Werte der für die vitalen Funktionen erforderlichen Bauwerke betrachtet*

*werden. Für Anlagen ohne Erdbeben-PSA sollen Übertragbarkeitsbetrachtungen durchgeführt werden.“*

Der Nachweis eines Robustheitslevels 1 entspräche der Erhöhung der Erdbebenintensität um eine Stufe. Dies entspricht bei jeweils gleichen Standorteigenschaften in etwa einem Faktor zwei in den abtragbaren Beschleunigungen. Gemäß (BMUB 2016) wurden für alle deutschen Druckwasserreaktoren mit der Genehmigung zu Leistungsbetrieb entsprechende Untersuchungen durchgeführt, die Beratungen hierzu sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Das ENSI nimmt zu den Fragility-Analysen in (ENSI 2016i) nur übergeordnet Stellung, ohne Zahlen zu nennen. Deshalb kann ein aktueller Vergleich mit den Gefährdungsannahmen – wie er in (Brettner et al. 2012) erfolgte – hier nicht mehr vorgenommen werden, da die aktuellen HCLPF-Werte nicht veröffentlicht wurden.

Die ausreichende Robustheit der Isolation des Primärkreislaufs und des Reaktor-Containments wurde bislang nur auf Basis der Gefährdungsannahmen des PRP Intermediate Hazard nachgewiesen.

Tabelle 3-2 enthält den bis zur Abgabe der neuen HCLPF-Werte in 2012 gültigen Maximalwert von 0,46 g als Maß für die Robustheit der Anlage. Dieser wird vom niedrigsten relevanten HCLPF-Wert im robustesten Abfahrstrang bestimmt. Der Sicherheitsfaktor resultiert aus dem maximalen HCLPF-Wert (Max. HCLPF) dividiert durch den jeweils gültigen PGA-Wert.

Allerdings ist davon auszugehen, dass sich die für die Anlage KKB ausgewiesenen HCLPF-Werte gegenüber 2012 vergrößert haben, da sie auf Basis einer Anpassung der alten Fragilityanalysen entstanden sind. Zur Anpassung selbst finden sich keine weiteren Informationen in (ENSI 2016i), so dass letztendlich nicht nachvollziehbar ist, in welcher Form die Angaben zu den Grenztragfähigkeiten der Systeme, Strukturen und Komponenten (SSK), die für die Beherrschung des Sicherheitserdbebens relevant sind, verändert wurden.

Höhere HCLPF-Werte können einerseits durch eine tatsächliche Erhöhung der Robustheit von SSK im Rahmen von Nachrüstungen bzw. Ertüchtigungen von Einrichtungen erzielt werden. Andererseits kann durch eine weniger konservative Bestimmung von HCLPF-Werten eine höhere Robustheit ausgewiesen werden, ohne dass dem eine veränderte Robustheit der Anlage entspricht. Wenn bspw., wie vom ENSI in Aussicht gestellt, einerseits die neuen Fragilityanalysen zwar als Stand von W&T bewertet werden, andererseits jedoch auch Optimierungspotenzial bei der neuen Methode und der neuen Art der Einbindung der Fragility-Werte in das Modell gesehen wird, so kann dies auch zu einer Ausweisung höherer Sicherheitsmargen ohne eine reale Änderung am Robustheitspotenzial der Anlage führen. Das ENSI konnte die Fragility-Analysen nur stichprobenartig überprüfen und hat die entscheidenden Fragility-Werte bspw. der Gleichstromversorgung nicht vollständig nachvollziehen können. Daher verbleiben Unsicherheiten bezüglich des erfolgten Nachweises, was als sicherheitstechnisch nachteilig anzusehen ist.

Die im Rahmen von AUTANOVE neu installierten Einrichtungen insbesondere zur Notstromversorgung des Abfahrpfades 1 können sich hinsichtlich der Robustheit positiv auswirken. Allerdings haben die verfahrenstechnischen Komponenten der Nachwärmeabfuhrstränge des Abfahrpfades 1 selbst auch ausreichend erdbebensicher zu sein, zu diesen wurden aber bisher – auch im Rahmen früherer PSÜs – keine Fragility-Daten veröffentlicht. Auch wurde die Sicherheitsmargenanalyse nur bis zum Zustand „heiß abgestellt“ untersucht. Insbesondere die Einrichtungen des ursprünglichen Sicherheitssystems könnten für die Beherrschung des Sicherheitserdbebens im Zustand „kalt abgestellt“ von Bedeutung sein, daher wäre die

Ausweisung von (ausreichend hohen) HCLPF-Werten für diesen Abfahrpfad von besonderer Bedeutung.

Nach wie vor der Inbetriebnahme des AUTANOVE wird der Abfahrpfad 2 vom ENSI als der „seismisch robustere“ eingestuft. Nach unserer Kenntnis wurden an diesem Pfad jedoch keine Nachrüstungen vorgenommen. Nimmt man für den Abfahrpfad 2 den gleichen HCLPF-Wert von 0,46 g wie 2011 an, so ergibt sich mit der neu zu unterstellenden Gefährdungsannahme des ENSI (PGA = 0,39 g, siehe Tabelle 3-2) ein Sicherheitsfaktor von 1,18 bei der Beherrschung eines Erdbebens mit einer Eintrittsrate von  $10^{-4}/a$ .

Würde man die jährliche Eintrittsrate entsprechend der deutschen Vorgaben auf  $10^{-5}/a$  anheben, käme man auf einen Sicherheitsfaktor von 0,59, die Erdbebenauslegung wäre somit nicht mehr ausreichend.

Es wird auf dieser Basis deutlich, dass ausgehend von der ursprünglichen Auslegung des KKB, selbst unter Berücksichtigung der bekannten, zwischenzeitlichen Ertüchtigungsmaßnahmen, die Anlage die Auswirkungen eines schweren Erdbebens entsprechend der aktuellen Gefährdungsannahmen – wenn überhaupt – weitgehend ohne Sicherheitsmargen beherrschen muss. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Tabelle 3-3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Kernschadenzustände (CDF) und des Anteils der erdbebenbedingten Kernschadenzustände (seismische CDF) der letzten Jahre.

**Tabelle 3-3: Vergleich der Entwicklung der Gesamt-CDF und der seismischen CDF**

Jahr der Veröffentlichung	BERA-2000	BERA-2009 / Stresstest 2011	BERA-2013
Seismische CDF	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$7,72 \cdot 10^{-6}$
CDF ohne seismischen Anteil	$6,56 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$
Gesamt-CDF	$7,92 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$9,35 \cdot 10^{-6}$
Anteil Erdbeben an Gesamt-CDF	17 %	74 %	83 %

Quelle: (axpo 2011e), (ENSI 2016i)

Zunächst ist die erdbebenbedingte Kernschadenshäufigkeit (seismische CDF) in der BERA-2009 gegenüber den früheren Werten in der BERA-2000 erheblich angestiegen, was auf die deutlich höheren zu unterstellenden Gefährdungsannahmen aus dem Pegasos-Projekt zurückzuführen ist. Demgegenüber wird in der BERA-2013 ein Wert von  $7,72 \cdot 10^{-6}/a$  ausgewiesen, der damit gegenüber dem früheren von  $1,27 \cdot 10^{-5}/a$  aus 2011 um rund 60% reduziert wurde. Einen wesentlichen Beitrag dabei spielte die Berücksichtigung des AUTANOVE, obwohl dieses damals noch nicht vollständig realisiert war. AUTANOVE führte nach Aussagen des ENSI zu einer Absenkung der Gesamt-CDF um 45% – wobei in der Bewertung des ENSI nicht darauf eingegangen wird, welcher Anteil dieser Reduzierung der CDF durch eine weniger konservative Neubewertung der vorhandenen Systeme, Strukturen und Komponenten erfolgte und welcher Anteil auf die realen Systemverbesserungen zurückgeführt werden kann.

Noch nicht berücksichtigt wurden dabei aber die neuen Erdbebengefährdungsannahmen des ENSI von 2015, die eine moderate Verschärfung gegenüber den PRP-IH-Annahmen darstellen und somit die neu ausgewiesenen Sicherheitsmargen wieder reduzieren werden. Die neuen Gefährdungsannahmen des ENSI, die gemäß den Ergebnissen in (ENSI 2016d) über den in BER-

2013 verwendeten Gefährdungsannahmen ( $PGA(H2) = 0,21 \text{ g}$ ;  $PGA(H3) = 0,35 \text{ g}$ ) liegen, sowie die geforderten Nachbesserungen des ENSI bei den Fragility-Werten dürften die CDF erneut ansteigen lassen. Insofern kann die Einschätzung des ENSI geteilt werden, dass durch den hohen seismischen Anteil an der Gefährdung auch die Gesamt-CDF ansteigen wird.

Angesichts des weiterhin hohen Anteils der erdbebenbedingten Versagenswahrscheinlichkeit an der gesamten Kernschadenshäufigkeit – trotz der im Rahmen von AUTANOVE und sonstiger Nachrüstungen bereits erzielten höheren Robustheit der Anlage KKB – ist weiterhin von einem nicht ausgewogenen Sicherheitskonzept auszugehen, so dass aus sicherheitstechnischer Sicht – wie auch bereits von ENSI gefordert – weitere Ertüchtigungen der Anlage KKB zu fordern sind.



## 4. Überflutung

Im Folgenden werden als Basis für die weitere Untersuchung zunächst die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) wiedergegeben. Daran anschließend werden, soweit zu diesem Themenfeld vorliegend, Erkenntnisse aus Darstellungen des Betreibers sowie der Aufsichtsbehörde zusammengefasst. Weiterhin wird u. a. auf Basis von (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) dargestellt, welche Auflagen bzw. Nachrüstungen mit Relevanz für die hier identifizierten Schwachstellen zwischenzeitlich beschlossen wurden.

### 4.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Die deutschen Anlagen weisen eine Grundausslegung für ein 10.000 jährliches Hochwasser auf. Die RSK hat für alle Anlagen signifikante Auslegungsreserven gegenüber dem nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik geforderten 10.000 jährlichem Hochwasser festgestellt. Die für die deutschen Anlagen ausgewiesenen Reserven zwischen dem Bemessungshochwasser und einem möglichen Eindringen von Wasser in sicherheitstechnisch relevante Gebäude liegen typischerweise im Bereich zwischen 0,5 und 1 m, zum Teil werden noch erheblich höhere Schutzhöhen ausgewiesen.

Für das KKB liegen aktuelle Untersuchungen zum 10.000-jährlichen Hochwasser vor. Hierbei ist für eine Abflussrate, die am oberen Ende des ermittelten Spektrums liegt, eine Überflutung des Anlagengeländes um maximal 0,37 m bestimmt worden. Diese bleibt damit um 1,28 m unterhalb der Auslegungsfluthöhe von 1,65 m. Die aktuellen Nachweise sind vom ENSI im August 2011 mit positivem Ergebnis geprüft worden. Somit liegt eine mit den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Anlagen grundsätzlich vergleichbare Situation vor, nämlich, dass bis zum Ausfall vitaler Funktion gegenüber dem Bemessungshochwasserstand noch Reserven bestehen. Diese sind im Falle des KKB mit 1,28 m erheblich.

In den deutschen Anlagen sind die zur Nachwärmeabfuhr vorgesehenen Systeme (Notspeisesystem, Nachkühlsystem) vollumfänglich in einem Redundanzgrad von (n+2) ausgeführt.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Leistungsbetrieb stehen im KKB beim aktuellen Anlagenzustand im Falle einer Überflutung vier vollumfänglich auf eine Fluthöhe von 1,65 m ausgelegte Stränge zur Verfügung. Einer der vier Pfade erfordert Maßnahmen, die in Deutschland als Notfallmaßnahmen eingestuft würden, alle vier Pfade sind von einem nur einfach vorhandenen Vorratsbehälter (BOTA) abhängig.

Für eine Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern stehen demgegenüber auslegungsgemäß nur zwei Pfade unter Nutzung des Notstandsystems zur Verfügung. Diese Pfade nutzen z. T. gemeinsame Komponenten. Mit beiden Pfaden ist ein Wassereintrag in das Primärcontainment verbunden, bei geschlossenem Primärkreislauf ist eine Öffnung desselben zur Dampf- und Wasserabgabe in das Containment erforderlich. Diese Fahrweisen würden in Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft, da die Nachkühlketten gegen Überflutung ausgelegt sind und somit keine Erfordernis für derartige Fahrweisen besteht.

Insgesamt stellen die o.g. Auslegungsmerkmale des KKB, insbesondere im Hinblick auf die Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern, aus unserer Sicht im Vergleich zur Auslegung der noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen einen sicherheitstechnischen Nachteil dar.

Eine Erhöhung der Zahl der bei einer externen Überflutung zur Nachwärmeabfuhr über die Dampferzeuger verfügbaren Stränge ergibt sich nach Realisierung des Projekts AUTANOVE, da dann ein weiterer flutsicherer Strang zur Nachwärmeabfuhr installiert sein wird.

#### 4.2. Darlegungen des Betreibers

Der Betreiber weist gemäß (ENSI 2016i) für externe Überflutungen einen Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit der Anlage KKB von  $1,33 \times 10^{-7}$  pro Jahr aus. Dabei dominiert das 10.000 jährliche Hochwasser aufgrund von starken Niederschlägen im Einzugsgebiet gegenüber anderen Hochwasserereignissen (wie einem Versagen von Talsperren bzw. Wehrbrüchen). ENSI akzeptiert die Überlegungen des Betreibers, verweist allerdings auf die Notwendigkeit einer Aktualisierung mit Blick auf lokale Starkregenereignisse, vgl. Kap. 8.

Im März 2015 ging der Block 1 des Kraftwerks Beznau für eine geplante Revision vom Netz. In 120 Tagen sollten mehrere langfristig geplante Großprojekte in der Anlage umgesetzt werden. Dazu gehört auch der Aufbau der neuen, autarken Notstromversorgung (AUTANOVE). Der Betreiber stellt hierzu fest (axpo 2015a):

*„Mit der Inbetriebsetzung der zwei Notstromaggregate für Block 1 wird eine zusätzliche erdbeben- und überflutungssichere Notstromversorgung geschaffen. Diese wird diejenige des Wasserkraftwerks Beznau ablösen. In den zwei bereits fertiggestellten, gebunkerten, auch gegen Flugzeugabstürze geschützten Gebäuden sind insgesamt vier leistungsstarke Dieselaggregate inklusive Hilfssystemen und zugehöriger Infrastruktur für eine Autarkiezeit von sieben Tagen Vollastbetrieb untergebracht.“*

Gemäß (Richner 2016) wurden in der Revision 2015 weiterhin im Rahmen des Projekts AUTANOVE die bisherige Notstromversorgung aus dem Wasserkraftwerk Beznau sowie von zwei 380-V-Flutdieseln durch zwei neue, seismisch qualifizierte Notstromdieselgeneratoren pro Block ersetzt. Des Weiteren erfolgt die Installation einer Grundwasser- und einer Sperrwasserpumpe zum Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren Strangs der Kernkühlung.

#### 4.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

Gemäß (UVEK 2009) wird für Überflutungen eine probabilistische Gefährdungsanalyse gefordert, wobei Gefährdungen mit einer Häufigkeit grösser gleich  $10^{-4}$  pro Jahr zu berücksichtigen und zu bewerten sind. Hinsichtlich möglicher Auswirkungen von Überflutungen sind Flutwellenwirkung auf Gebäude, Eindringen von Wasser in Gebäude und Unterspülung von Gebäuden zu berücksichtigen.

Mit (ENSI 2011j) hat ENSI ihre mit (ENSI 2011g) angeordnete Sicherheitsüberprüfung mit Blick auf Überflutungen konkretisiert. Danach waren den Sicherheitsüberprüfungen die aktualisierten Hochwassergefährdungsannahmen für das 10.000 jährliche Hochwasser aus den Rahmenbewilligungsgesuchen (ENSI 2010b) zugrunde zu legen. Dabei sei auch der damalige Hinweis 7 zu berücksichtigen, wonach die Berechnungen für das 10.000 jährliche Hochwasser durch die Bestimmung einer Probable Maximum Flood (PMF) zu ergänzen sei.

Speziell mit Blick auf eine durch Erdbeben ausgelöste Überflutung waren zwei Varianten der Nachweisführung zulässig. Entweder war für relevante Stauanlagen deterministisch nachzuweisen, dass bei diesen für ein 10.000 jährliches Erdbeben eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen werden kann. Alternativ war deterministisch der Nachweis der Beherrschung einer Kombination von Erdbeben und Versagen von Stauanlagen im Einflussbereich

des Kernkraftwerks zu zeigen. Erste Untersuchungen waren vom Betreiber vorgelegt und vom ENSI mit (ENSI 2011f) bewertet worden.

Nach (ENSI 2016g) wurde der Nachweis erbracht, dass die Kernkühlung im Fall eines 10.000-jährlichen Hochwassers einzelfehlersicher gewährleistet ist. Die Anlagen können in einen sicheren Zustand überführt und dort über 72 Stunden mit auf dem Anlagengelände verfügbaren Notfallmitteln gehalten werden.

ENSI stellt in (ENSI 2016i) fest, dass das KKB gegen Überflutungen bis zu einer Flutkote von 328,65 m ü. M. ausgelegt ist. Der Auslegung lagen Berechnungen aus dem Jahr 1968 zum Versagen eines Wehrschützes des Kraftwerks Rupperswil-Auenstein mit einer darauf folgenden Flutwelle von maximal 328,61 m ü. M. als Bemessungswert zugrunde. Das Anlagenareal wäre in diesem Fall bis zu einer Höhe von 1,61 m überflutet. Zwischen den Jahren 2008 und 2011 aktualisierte Hochwassergefährdungskurven weisen aus, dass einem 10.000 jährlichen Hochwasser ein Spitzenabfluss von 4.200 m<sup>3</sup>/s entspricht, was mit einer Wasserkote von 327,37 m ü. M. einhergehen würde. Daraus resultiert an Gebäudekanten eine Überflutungshöhe von 0,37 m, auf dem Anlagengelände von 0,6-0,8 m, lokal im ungünstigsten Fall bis 1,0 m. Demgegenüber führe ein Versagen von Stauhaltungen stromaufwärts heute zu geringeren Abflussmengen und damit Überflutungshöhen als das 10.000 jährliche Hochwasser.

Nach (ENSI 2014c) wurde 2012 ein nationales Projekt eingeleitet, um die wissenschaftlichen Grundlagen zur Bestimmung der Hochwassergefährdung der schweizerischen Kernkraftwerke zu verbessern. Gemäß (ENSI 2016e) erfolgt zurzeit im Rahmen des Projekts EXAR eine Neubestimmung der Hochwassergefährdung durch die Aare. Laut (ENSI 2016c) wurde die Hauptstudie dieses Projekts Anfang 2016 gestartet. Gemäß (BAFU 2016) sollen Resultate in Form von Gefahrenszenarien für die relevanten Beurteilungssperimeter bis 2018 vorliegen.

#### 4.4. Auflagen und Nachrüstungen

Im Rahmen des Projekts ERSIM (vgl. Kap. 2.4) sollte von den Betreibern die Sicherheitsmarge der verschiedenen Abfahrpfade gegenüber dem 10.000 jährlichen Hochwasser ausgewiesen werden. Dabei wurde gemäß (ENSI 2015a) die Sicherheitsmarge als die Differenz zwischen einer kritischen Überflutungshöhe, die sich aus einem Verlust der betrachteten Einheit (von der einzelnen Komponente bis hin zur Gesamtanlage) ergibt, zur Referenz-Überflutungshöhe des 10.000 jährlichen Hochwassers definiert. Nach einer Grobprüfung der eingereichten Unterlagen wurden vom ENSI Nachforderungen erhoben, so dass die ursprünglich geplante Detailprüfung noch nicht abgeschlossen war.

Nach (ENSI 2014d, ENSREG3.1.3) sind das Reaktorgebäude und die gebunkerten Notstandssysteme gegen ein Eindringen von Wasser ausgelegt. Für weitere sicherheitsrelevante Gebäude wurde die Sicherheit gegen Überflutung durch mobile Barrieren erhöht.

Gemäß (ENSI 2015a) wurde im Rahmen der sicherheitstechnischen Überprüfung auch die erforderliche Dichtheit von Gebäuden im Falle einer Überflutung des Anlagengeländes beim 10.000 jährlichen Hochwasser behandelt (Prüfpunkt 4), sich daraus ergebende weitere Nachforderungen wurden im Projekt ERSIM sowie im Rahmen der laufenden Aufsicht behandelt.

In (ENSI 2016g) stellt das ENSI fest, dass gemäß der Analysen zur naturbedingten Überflutung das KKB über deutliche Sicherheitsmargen verfüge.

Durch eine Erhöhung der Überflutungssicherheit der Notstandssysteme seit 2012 wurden die Sicherheitsmargen der Anlage gegen Hochwasser mittlerweile auf mehrere Meter über

Anlagenniveau erhöht (ENSI 2016i). So hat nach (ENSI 2016e) die Überprüfung des Kernkraftwerks Beznau gezeigt, dass durch eine Verbesserung der Dichtheit des Notstandsbrunnens die Sicherheitsmarge deutlich verbessert werden kann. Entsprechende Maßnahmen wurden zwischenzeitlich umgesetzt. Dadurch stieg die Sicherheitsmarge der Notstandssysteme gegen eine externe Überflutung auf 6,15 m, was einer Überflutung des Kraftwerksgeländes von 7,00 m entspricht. Das ENSI überprüft zurzeit, ob weitere Maßnahmen sinnvoll sind, um den Schutz der herkömmlichen Sicherheitssysteme gegen eine externe Überflutung weiter zu verbessern.

Für die Nachweise zum Überflutungsschutz hat das ENSI gemäß (ENSI 2012a) gefordert, auch die Möglichkeit von Verklauungen, d. h. eines teilweisen oder vollständigen Verschlusses von Fließquerschnitten als Folge von Treibgut, zu berücksichtigen. Die Anlage KKB hatte bereits einen diesbezüglichen Bericht eingereicht, dessen Prüfung durch das ENSI bis zum 31.12.2012 erfolgen sollte.

In (ENSI 2013a) stellt ENSI fest, dass die vorliegende Untersuchung für das KKB nicht auf die Möglichkeit eines Cliff-Edge Effekts für diese Anlage hinweise, dass es jedoch für eine endgültige Beurteilung weitere Informationen angefordert habe. Das weitere Vorgehen werde im Rahmen der ordentlichen Aufsicht weiter durchgeführt. Gemäß (ENSI 2014b) wurden Angaben des KKB zu Möglichkeit und Auswirkungen einer Verklauung des Wehrs Beznau beziehungsweise der Brücke über den Oberwasserkanal geprüft. Auch für diese Fälle stehe der Nachweis der Hochwassersicherheit des KKB nicht in Frage, es verblieben ausreichende Sicherheitsmargen.

Nach (ENSI 2015a) wurden von den Betreibern der Anlagen KKB, KKG und KKL Ende 2013 verfeinerte Analysen eingereicht. In (ENSI 2016g) wird festgestellt, dass die relevanten verklauungsgefährdeten Engstellen identifiziert und die daraus resultierenden Überflutungssituationen bewertet wurden. Aus Sicht des ENSI zeigen die standortspezifischen Untersuchungen, dass Verklauungen nicht zu einer wesentlichen Verschärfung der Hochwassergefährdung beitragen und damit keinen Cliff-Edge-Effekt auslösen können.

Nach (ENSI 2016i) wurde im Rahmen des Projekts AUTANOVE ein weiterer erdbeben- und flutsicherer Sicherheitsstrang zur Energieversorgung der Kühlung des Reaktors nach Einwirkungen von außen aufgebaut. Für das Notspeisewassersystem wird eine automatische, erdbebenfeste Nachspeisung von Wasser aus dem Notstandbrunnen in den Notspeisewassertank nachgerüstet. Außerdem wird die Versorgung der Notspeisepumpe von einer neuen, erdbebenfest versorgten Notstromschiene sichergestellt. Für die Sperrwasserversorgung wird eine zusätzliche seismisch qualifizierte Sperrwasserpumpe, die über die neu aufgebaute Notstromschiene elektrisch versorgt wird, errichtet. Das Projekt wurde für den Block 2 des KKB in 2015 mit einem abschließenden Funktionstest abgeschlossen. Für Block 1 sei geplant, die Integration in 2016 abzuschließen. Zur Bedeutung des Projekt AUTANOVE für die elektrische Energieversorgung des KKB vgl. auch Kap. 6.

#### **4.5. Stellungnahme**

Bereits in (Brettner et al. 2012) haben wir festgestellt, dass die schweizerische Regelwerksvorgabe, als Bemessungsereignis das 10.000-jährliche Hochwasser zu Grund zu legen, den Vorgaben im deutschen Regelwerk und dem Basislevel im RSK Stresstest entspricht, der auch von den deutschen Anlagen erfüllt wird. Auch die zwischenzeitlich vom Betreiber vorgelegten und von ENSI geprüften zusätzlichen Nachweise bestätigen, dass die Anlage KKB für dieses Hochwasser ausgelegt ist.

Auch für die deutschen Anlagen wurden Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs, zur Stärkung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf den Eintritt von seltenen Einwirkungen von außen und zur Beherrschung des Ausfalls der Primären Wärmesenke durchgeführt und für alle Anlagen abgeschlossen (BMUB 2016). Damit ergibt sich hieraus kein bewertungsrelevanter Unterschied.

Auch die darüber hinaus für die Anlage KKB ausgewiesenen Reserven von über einem Meter bei Berücksichtigung der Sicherheitssysteme, von sogar mehreren Metern bei Berücksichtigung ausschließlich der Notstandssysteme ist erheblich und mit den für die deutschen Anlagen ausgewiesenen Reserven im Bereich zwischen 0,5 und 1 m mindestens gleichwertig.

Wie bereits in (Brettner et al. 2012) festgestellt, gilt für die in den deutschen Anlagen zur Nachwärmeabfuhr sowohl ausgehend vom Leistungsbetrieb als auch ausgehend vom Anlagenstillstand vorgesehenen Systeme (Notspeisesystem, Nachkühlsystem), dass diese vollumfänglich in einem Redundanzgrad von (n+2) ausgeführt sind.

Gemäß (BMUB 2016) wurde weiterhin für alle Anlagen eine diversitäre ultimative Wärmesenke geschaffen. Auch wurde bei den Reaktoren, bei denen eine diversitäre Versorgung des Zwischenkühlsystems bislang nicht möglich war, eine zusätzliche mobile Pumpe für den Aufbau einer verkürzten Nachkühlkette bereitgestellt.

Für die Beherrschung eines Hochwasserereignisses in der Anlage KKB stehen auslegungsgemäß ausgehend vom Leistungsbetrieb, also bei verfügbaren Dampferzeugern, das Hilfsspeisewassersystem sowie das Notstandssystem zur Verfügung. Aufgrund der pro Block nur einmal vorhandenen Brunnenwasserpumpen (LBW und LNB) entspricht dies also einer grundsätzlich zweisträngigen Auslegung (n+1). Durch die Nachrüstungen im Rahmen von AUTANOVE steht mit dem Notspeisesystem ein zusätzlicher Strang zu Bespeisung der Dampferzeuger auch bei Hochwasser zur Verfügung, der jedoch für den langfristigen Betrieb ebenfalls auf die Notstand-Brunnenwasserpumpen angewiesen ist. Die Pfade mit Nutzung des Hilfs- oder des Notstandspeisewassersystems sind von der Verfügbarkeit von einem pro Block nur einfach vorhandenen Vorratsbehälter (BOTA) abhängig. Inwieweit dies auch für den im Rahmen von AUTANOVE zusätzlich zur Verfügung stehenden Pfad über das Notspeisesystem gilt, ist aus den uns vorliegenden Unterlagen nicht eindeutig erkennbar.

Ausgehend vom Anlagenstillstand, also bei unverfügbaren Dampferzeugern, stehen in der Anlage KKB aufgrund des auslegungsgemäß nicht verfügbaren primären Nebenkühlwassersystems ausschließlich Pfade zur Nachwärmeabfuhr zur Verfügung (Notstand-Rezirkulation, Nachwärmeabfuhr mit Feed-and-Boil, AM-Maßnahmen), die in Deutschland als Notfallmaßnahme eingestuft würden.

Insgesamt stellen diese Auslegungsmerkmale des KKB, insbesondere im Hinblick auf die Nachwärmeabfuhr ausgehend vom Stillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern, aus unserer Sicht gegenüber dem Sicherheitsstatus der noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen einen sicherheitstechnischen Nachteil dar.



## 5. Brennelement-Lagerbecken

Im Folgenden werden als Basis für die weitere Untersuchung zunächst die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) wiedergegeben. Daran anschließend werden, soweit zu diesem Themenfeld vorliegend, Erkenntnisse aus Darstellungen des Betreibers sowie der Aufsichtsbehörde zusammengefasst. Weiterhin wird u. a. auf Basis von (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) dargestellt, welche Auflagen bzw. Nachrüstungen mit Relevanz für die hier identifizierten Schwachstellen zwischenzeitlich beschlossen wurden.

### 5.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Im Hinblick auf den Erhalt der Kühlung der in den Lagerbecken befindlichen Brennelemente kommt den Maßnahmen zur Gewährleistung der Beckenintegrität, u.a. bei Einwirkungen von außen, sowie dem Erhalt des Wasserinventars im Becken (Vermeidung von Wasserverlusten infolge von Lecks angrenzender Rohrleitungen) oberste Priorität zu.

Hinsichtlich des Erhalts der Beckenintegrität bei einem Erdbeben ist festzustellen, dass ein Versagen der Lagerbecken im KKB auch für sehr starke, auslegungsüberschreitende Erdbeben nicht zu besorgen ist, sofern die im Rahmen des EU-Stresstests ausgewiesene Robustheit für die Lagerbecken vom ENSI explizit bestätigt wird. In seinem Aufsichtsbericht zum EU Stress-Test hat das ENSI eine Integritätsgefährdung der Lagerbecken ausgeschlossen.

Dazu, ob es infolge von Saugheberwirkungen zu Wasserverlusten aus den Lagerbecken kommen kann, wurden im Rahmen des EU Stress Tests weder von KKB noch vom ENSI Aussagen getroffen. Im Zuge der Überprüfung der vom KKB zum 31. März 2012 vorgelegten neuen Erdbebennachweise wurde vom ENSI verfügt, dass das KKB bis zum 30. September 2012 überprüfen muss, ob kurzfristig realisierbare Maßnahmen zur Verhinderung einer unzulässigen Füllstandsabsenkung durch Saughebewirkung in einer bestimmten Betriebssituation beim Brennelementlagerbecken ergriffen werden können. Saugheberwirkungen durch in das Lagerbecken einbindende Rohrleitungen, die zu einer weitgehenden oder vollständigen Entleerung der Lagerbecken führen können, sind bei den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Anlagen konstruktionsbedingt ausgeschlossen. Dies stellt aus unserer Sicht einen sicherheitstechnischen Vorteil der deutschen Anlagen dar.

Die derzeit zur Lagerbeckenkühlung im KKB vorgesehenen Systeme stehen bei einem Sicherheitserdbeben oder einer externen Überflutung nicht auslegungsgemäß zur Verfügung. Demgegenüber bleiben die in den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen installierten Beckenkühlsysteme bei einer externen Überflutung vollumfänglich verfügbar. Im Falle eines Erdbebens könnte bei einem unterstellten Versagen des dritten Beckenkühlstrangs im Ringraum und einem Versagen der Absperrung des Stranges infolge Einzelfehler ggf. ein Absinken des Füllstandes derart erfolgen, dass die beiden anderen Stränge zur Lagerbeckenkühlung ohne Leckabsperrung und Aufspeisung des Beckens nicht funktionsfähig wären. Ohne unterstellten Einzelfehler bleiben in den deutschen Anlagen zwei Stränge zur Lagerbeckenkühlung verfügbar.

Nach Realisierung der vom ENSI verfügten Nachrüstungen von zusätzlichen Beckenkühlsystemen für das KKB bis zum Jahr 2015 wird, soweit auf Basis der vorliegenden Unterlagen erkennbar, im KKB ein zweisträngiges System zur Verfügung stehen, das auch bei externen Überflutungen und Erdbeben einsatzfähig bleibt. Damit wären die derzeit bestehenden Defizite im Hinblick auf die Lagerbeckenkühlung behoben.

Die Lagerbecken sind im KKB in einem separaten Gebäude untergebracht, in den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen hingegen innerhalb des Containments im Reaktorgebäude. Dies gewährleistet einen zusätzlichen Schutz gegen mechanische Einwirkungen von außen und eine bessere Spaltproduktrückhaltung im Falle von Brennelementschäden. Vor diesem Hintergrund stufen wir die Unterbringung der Lagerbecken innerhalb des Containments als sicherheitstechnischen Vorteil der deutschen Anlagen ein.

## 5.2. Darlegungen des Betreibers

Gemäß (axpo 2011b) stand bis zum Ereignis in Fukushima eine vollumfänglich erdbebenqualifizierte und gebunkerte Kühlung der Brennelementlagerbecken nicht zur Verfügung, die damaligen Kühlsysteme konnten auch nicht vom Notstandsystem versorgt und gesteuert werden.

Im Rahmen der Umsetzung des Projekts AUTAVONE sollen die bisherigen Kühlsysteme des Brennelementlagerbeckens (FAC-System) über die gesicherten Notstromschienen versorgt werden (axpo 2011b). Bisher werde nur ein Strang von einer Notschiene versorgt, der andere Strang über eine betriebliche Schiene, die aber im Anforderungsfall über eine Querkupplung von einer anderen Notschiene versorgt werden könnte.

Gemäß (Richner 2016) seien mittlerweile mobile Anschlusspunkte für die Einspeisung mit Feuerwehrpumpen in das Brennelement-Lagerbecken (über zwei räumlich getrennte Nachspeisemöglichkeiten) in KKB vorhanden.

Weiterhin habe ENSI die Erstellung eines neuen, erdbebensicheren, aus dem Notstandsystem versorgten Kühlsystems für das Brennelement-Lagerbecken auf Sicherheitsebene 3 gefordert, dessen Errichtung in Arbeit sei.

Schließlich seien Arbeiten zur Ertüchtigung des Überdruckschutzes des BE-Lagerbeckengebäudes sowie der Lagerbeckeninstrumentierung im Gange.

## 5.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

Gemäß (ENSI 2016i, S. 358) ist bislang von den zwei betrieblichen Beckenkühlsträngen (FAC-System) nur ein Strang notstromversorgt.

Nach (ENSI 2016g) können die für die aktive Kühlung der Brennelementbecken erforderlichen Nachwärmeabfuhrsysteme im Kernkraftwerk Beznau für das Sicherheitserdbeben nicht kreditiert werden. Die Nachweise bezüglich der Sicherstellung der Kühlung der Brennelemente in den Lagerbecken beim Kernkraftwerk Beznau konzentrierten sich für den Schutz gegen Erdbeben auf den Integritätserhalt der Lagerbecken und die passive Verdampfungskühlung.

In (ENSI & TFK 2014a) wird festgestellt, dass das Brennelementlagerbecken außerhalb des Reaktorgebäudes liegt, jedoch von geringer Höhe, zwischen massiven Gebäuden eingebaut und durch diese gut geschützt sei. Obwohl es vom Deckenbereich aus nicht wesentlich gegen einen Flugzeugabsturz geschützt sei, weise das Becken selber massive Seiten- und Bodenwandstärken (mindestens 1,8 m) auf, die einen ausreichenden Trümmerschutz bieten und größere Leckagen verhindern. Da die Brennelemente in diesem Becken aus Strahlenschutzgründen tief gelagert sind und eine ca. 5 m starke Wasserüberdeckung haben, sei zu erwarten, dass die Kühlung auch unter Störfallbedingungen gewährleistet bleibt. Die Brennelemente im Brennelementbecken seien somit gut geschützt und die Kühlung könnte notfalls längerfristig mittels vorbereiteter Accident-Management-Maßnahmen sichergestellt werden. Die Mittel für das Accident Management wurden

nach dem Unfall von Fukushima für alle Schweizer Kernkraftwerke umfassend erweitert. Schließlich seien die Brennelementlagerbecken gegen Erdbeben ausgelegt. Die im Jahr 2012 aktualisierten Erdbebennachweise zeigten deren ausreichende Robustheit.

#### 5.4. Auflagen und Nachrüstungen

Zur Verbesserung der Lagerbeckenkühlung wurde gemäß (ENSI 2012b) für die Anlage Beznau gefordert,

- eine Möglichkeit, im Rahmen von Notfallmaßnahmen Wasser in das Lagerbecken über zwei unabhängige Einspeisepfade einspeisen zu können, ohne dass hierzu das Lagerbeckengebäude betreten werden muss (bis 2013),
- die Nachrüstung einer störfallsicheren Instrumentierung des Lagerbeckens zur Überwachung von Füllstand und Temperatur (bis 2014),
- Verbesserungen der seismischen Robustheit des Lagerbeckengebäudes sowie die Nachrüstung einer Venting-Leitung aus dem Lagerbeckengebäude, um die anfallende Nachwärme bei siedendem Lagerbecken abführen zu können (bis 2014) sowie
- die Nachrüstung eines als Sicherheitssystem qualifizierten Lagerbecken-Kühlsystems (bis 2015).

Nach (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.10) sind in KKB Maßnahmen zur Erhöhung der seismischen Robustheit des Brennelement-Lagerbeckengebäudes erforderlich. Nach (ENSI 2016i) erfolgte eine Ertüchtigung des BE-Lagerbeckengebäudes durch Ersatz einer Mauerwerkswand durch eine Betonwand und Einbau neuer Betonwände im Jahr 2014/2015.

Hinsichtlich der seismischen Robustheit der Brennelementbecken selbst sowie deren Anschlussleitungen stellt (ENSI 2016g) fest, dass die Integrität der Brennelementbecken beim Sicherheitserdbeben (gemäß PRP-IH) gewährleistet ist.

In (ENSI 2011i) wurde gefordert, dass Temperatur und Füllstand im Brennelement-Lagerbecken im Rahmen der Störfallübersichtsanzeigen in den Leit- und Steuerstellen zur Verfügung stehen. Gemäß (ENSI 2014a) soll die Forderung für eine neue Beckenstörfallinstrumentierung, die sowohl die Kühlmitteltemperatur als auch den Beckenfüllstand überwacht, in die ENSI Richtlinie B12 eingehen. In der Revision 1 vom 31.10.2015 in (ENSI 2015g) sind jedoch keine Anforderungen mit Blick auf die Überwachung von Temperatur und Füllstand im Lagerbecken im Rahmen der Störfallinstrumentierung enthalten. Inwieweit diese Parameter gegebenenfalls Bestandteil des Safety Parameter Display System (SPDS) sein sollen, ist aus (ENSI 2015g) nicht erkennbar. Einrichtungen des SPDS sind zwar auf die entsprechenden Umgebungsbedingungen auszulegen, müssen jedoch nicht qualifiziert sein. Nach (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.5) und (ENSI 2015a) laufen in allen schweizerischen Anlagen Nachrüstmaßnahmen zur Instrumentierung des Lagerbeckens, gemäß (IAEA 2015) wurden für alle schweizerischen Anlagen bis 2014 zusätzliche Instrumentierungen des Lagerbeckens implementiert.

Nach (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.10) ist in der Anlage KKB die Nachrüstung eines erdbebenfesten und überflutungssicheren Brennelement-Lagerbeckenkühlsystems vorgesehen, jedoch noch nicht abgeschlossen. Weiterhin soll eine Ventingmöglichkeit zur Abfuhr der bei auslegungsüberschreitenden Störfällen anfallenden Wärme und zum Druckabbau nachgerüstet werden. Der Abschluss dieser Nachrüstmaßnahmen wurde zunächst für das Jahr 2014 erwartet.

Hinsichtlich der Beherrschung von Leckagen und der langfristigen Kühlung des Brennelement-Lagerbeckens bei schweren Unfällen stellt (ENSI 2015a) fest, dass die entsprechenden

Überprüfungen in 2011 und 2012 abgeschlossen wurden und resultierende Nachrüstprojekte im KKB von ENSI beaufsichtigt werden.

Die zur Erhöhung der Sicherheit des Lagerbeckens vorgesehenen Maßnahmen sind im Rahmen des Projekts NABELA (Nachrüstung BE-Lagerbecken) nach (ENSI 2016i) verschiedenen Einzelprojekten zugeordnet.

So sieht KKB die Nachrüstung eines BE-Lagerbecken-Zusatzkühlsystem vor, welches als Sicherheitssystem qualifiziert ist und auch beim Sicherheitserdbeben zur Verfügung steht. Dieses übernimmt die Kühlung des BE-Lagerbeckens bei Ausfall sämtlicher betrieblicher Kühlsysteme. Das einsträngige System enthält keine zusätzlichen Pumpen, sondern nutzt einen Teil des von den Pumpen des Notstand-Brunnenwassersystems (LNB) geförderten Kühlwassers. Eine eigene Energieversorgung des Systems ist nicht erforderlich, da es ohne eigene aktive Komponenten betrieben wird. Aufgrund von Schwierigkeiten beim Nachweis der Erdbebensicherheit der anfänglich vorgesehenen Einhängenkühler musste die Konstruktion der Einhängenkühler in der Folge geändert werden, was zu wesentlichen Verzögerungen gegenüber der ursprünglichen Terminplanung geführt hat. Die Realisierung des Systems ist deshalb für 2017 vorgesehen.

Ein Teilprojekt verlangt die Nachrüstung einer redundanten Notnachspeisemöglichkeit in das BE-Lagerbecken aus diversitären Kühlmittelquellen. Diese ist auch mit dem BE-Lagerbecken-Zusatzkühlsystem über das mit LNB-Brunnenwasser oder mit Mitteln der Feuerwehr möglich. Die vom ENSI verlangte Nachrüstung einer redundanten Notnachspeisemöglichkeit aus diversitären Kühlmittelquellen wurde im KKB gemäß (ENSI 2016i) bereits realisiert. Mit dieser Maßnahme kann das Kühlmittelinventar in den BE-Lagerbecken bei auslegungsüberschreitenden Störfällen ergänzt werden, wenn eine ungenügende Beckenkühlung zum Absinken des Füllstands führen sollte. Die Kühlmittelnachspeisung kann in Betrieb genommen werden, ohne dass das BE-Lagergebäude betreten werden muss.

Weiterhin ist gemäß (ENSI 2016i) zur Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr nach dem Ausfall aller Beckenkühlsysteme ein neues Druckabbausystem des Brennelementlagerbeckengebäudes vorgesehen, mit dem das verdampfte Beckenwasserinventar über den Fortluftkamin abgegeben werden kann. Das Konzept, die Auslegung und die Montage der geplanten Änderungen (neues Druckabbausystem des Brennelementlagerbeckengebäudes) wurden vom ENSI freigegeben. Die Realisierung ist bis zum Jahre 2017 vorgesehen und wird vom ENSI im Rahmen des Freigabeverfahrens überwacht.

Schließlich ist gemäß (ENSI 2016i) für die Temperatur- und Füllstandmessung in den BE-Lagerbecken die Installation geeigneter redundanter, störfallsicherer Sonden geplant. Der Messbereich der Füllstandsonden wird so gewählt, dass ein Absinken des Füllstands unter die Oberkante der gelagerten Brennelemente erkennbar ist. Durch die Instrumentierung wird eine Überwachung der BE-Lagerbecken auch bei auslegungsüberschreitenden Störfällen ermöglicht, die Messwerte werden im geschützten Notstandleitstand angezeigt. Auch bei Ausfall der Energieversorgung können die Messwerte im Rahmen von Notfallschutzmaßnahmen (durch Druckluftflaschen, konventionelle Widerstandsmessgeräte) bestimmt werden. Die im Projekt NABELA vorgesehene neue Brennelementlagerbecken-Niveau und –Temperaturmessung soll zukünftig zur Störfallinstrumentierung gehören.

Insgesamt ist für die im Projekt NABELA vorgesehenen Nachrüstungsmaßnahmen für die Errichtung einer zusätzlichen Brennelementlagerbeckenkühlung und -bespeisung, Niveau- und Temperaturmessung und Gebäudeentlastung nach (ENSI 2016i) wegen technischer Gründe die Frist bis Ende 2017 verlängert worden.

Bereits in der Verfügung (ENSI 2011i) wurde die Anlage KKB dazu aufgefordert, eine Bewertung der Maßnahmen zum Schutz gegen Wasserstoffdeflagrationen und –explosionen im Bereich des Brennelement-Lagerbeckens vorzunehmen. Gemäß (ENSI 2012a) wurden darauf aufbauend Forderungen gestellt, die zur Verbesserung der Druckentlastungssysteme und –abläufe beitragen. Weiterhin sollen die Strategien zum Wasserstoffmanagement und zum Einsatz der gefilterten Druckentlastung überprüft werden. Nach (ENSI 2013a) ist das ENSI auf Basis der Untersuchungen der Betreiber zu dem Schluss gekommen, dass im Bereich der Brennelement-Lagerbecken die Wasserstoffproduktion durch Radiolyse nicht ausreicht, um ein zündfähiges Gemisch entstehen zu lassen. Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit der schweizerischen Kraftwerke sollen daher nicht im Bereich der mitigativen Maßnahmen (also eines Umgangs mit entstehendem Wasserstoff bei schweren Unfällen) sondern im Bereich der präventiven Maßnahmen (also einer Ertüchtigung der Kühlsysteme zur Verhinderung eines schweren Unfalls) angesiedelt werden.

Mit Blick auf eine mögliche Saugheberwirkung beim Bruch von Anschlussleitungen stellt (ENSI 2016i) fest, dass unabhängig von den Ertüchtigungen im Rahmen des Projekts NABELA Druckentlastungsbohrung angebracht und eine zusätzliche Rückschlagklappe montiert werden, um einen Syphoneffekt mit teilweiser Entleerung des Kühlmittelinventars zu verhindern.

(ENSI 2016i) kommt zum Schluss, dass mit der Realisierung des Projekts NABELA und der zusätzlich vom KKB ergriffenen Maßnahme zur Sicherstellung des Kühlmittelinventars der BE-Lagerbecken die Brennelementlagerung im KKB ein Sicherheitsniveau aufweist, das bezüglich Qualifikation des Kühlsystems und gesicherter diversitärer Kühlmittelversorgung dem Stand der Nachrüsttechnik entspricht.

## 5.5. Stellungnahme

Im Hinblick auf den Erhalt des Wasserinventars im Becken hat die Aufsichtsbehörde bestätigt, dass in KKB Maßnahmen gegen einen Wasserverlust aufgrund Saughebewirkung bei Versagen von anschließenden Rohrleitungen ergriffen werden. Der tatsächliche Umsetzungsstand ist nicht bekannt, Ende 2016 wurde die Umsetzung der Maßnahmen noch nicht als abgeschlossen bestätigt. Saughebewirkungen durch in das Lagerbecken einbindende Rohrleitungen, die zu einer weitgehenden oder vollständigen Entleerung der Lagerbecken führen können, sind bei den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Anlagen konstruktionsbedingt ausgeschlossen.

Die offenen Maßnahmen hinsichtlich einer Verhinderung eines Wasserverlusts aus dem Brennelement-Lagerbecken durch Saughebewirkung stellen aus unserer Sicht bis zur endgültigen Umsetzung der Maßnahmen einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Weitere, von ENSI in der Folge von Fukushima angeordnete Nachrüstungen zur Erhöhung der Robustheit des Lagerbeckengebäudes bei Erdbeben sind umgesetzt, so dass sich hieraus kein bewertungsrelevanter Unterschied ergibt.

Die noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Druckwasserreaktoren verfügen über zwei dem Sicherheitssystem zugeordnete Brennelement-Lagerbeckenkühlstränge. Darüber hinaus weisen die Anlagen einen dritten Beckenkühlstrang (betrieblicher Kühlstrang) auf, der als Ersatzmaßnahme zur Beherrschung von Ereignissen, die die Lagerbeckenkühlung betreffen, grundsätzlich kreditiert werden kann, sofern seine zuverlässige Funktion unter den jeweiligen Ereignisrandbedingungen gezeigt ist (RSK 2015a). Der dritte Beckenkühlstrang ist redundant, die zum Sicherheitssystem gehörenden Stränge sind diversitär notstromversorgt.

Beim Bemessungshochwasser bleiben alle Beckenkühlsysteme vollumfänglich verfügbar, so dass das Einzelfehlerkonzept erfüllt ist. Die Funktionsfähigkeit des dritten Beckenkühlstrangs ist nach

Bemessungserdbeben nicht nachgewiesen. Damit erfüllt die Lagerbeckenkühlung beim Bemessungserdbeben bis auf eine spezifische Ausnahme das Einzelfehlerkriterium. Im Falle eines Erdbebens könnte bei einem unterstellten Versagen des dritten Beckenkühlstrangs im Ringraum und einem Versagen der Absperrung des Stranges infolge Einzelfehler ggf. ein Absinken des Füllstandes derart erfolgen, dass die beiden anderen Stränge zur Lagerbeckenkühlung ohne Leckabsperrung und Aufspeisung des Beckens vorübergehend nicht funktionsfähig wären.

Die derzeit zur betrieblichen Lagerbeckenkühlung im KKB vorgesehenen Systeme (FAC) stehen bei einem Sicherheitserdbeben oder einem Bemessungshochwasser auslegungsgemäß nicht zur Verfügung. Sie sind nicht als Sicherheitssysteme eingestuft. Durch die Umsetzung des Projekts AUTANOVE ist jedoch eine Verbesserung der Notstromversorgung dieser betrieblichen Beckenkühlsysteme erfolgt. Auch das alternative, Brennelementlagerbeckenkühlsystem (FEC) ist als rein betriebliches Kühlsystem einzustufen, das als Ersatzmaßnahme bei Instandhaltungsarbeiten am betrieblichen Beckenkühlsystem eingesetzt werden kann. Die Nachrüstung eines als Sicherheitssystem qualifizierten unabhängigen Beckenkühlstrangs, der auch bei Einwirkungen von außen verfügbar bleibt, ist vorgesehen, jedoch noch nicht umgesetzt. Die Umsetzung der Nachrüstung war bis Ende 2014 vorgesehen und ist nun bis Ende 2017 geplant.

Insgesamt steht damit in der Anlage KKB bislang kein und auch nach Abschluss der geplanten Nachrüstungen nur ein als Sicherheitssystem qualifizierter Strang zur Beckenkühlung zur Verfügung. Dieser wird durch zwei als betrieblich qualifizierte Stränge sowie den einen Strang des alternativen Beckenkühlsystems ergänzt, die bei Einwirkungen von außen als nicht verfügbar anzusehen sind.

Die zur Beherrschung von Ereignissen auf der Sicherheitsebene 3 zur Verfügung stehenden Einrichtungen stellen aus unserer Sicht insbesondere bis zur endgültigen Umsetzung der Nachrüstung eines als Sicherheitssystem qualifizierten Strangs, jedoch auch darüber hinaus, einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

In deutschen Anlagen ist eine zusätzliche, fest verlegte Einspeisemöglichkeit von außen in das BE-Lagerbecken mit der Möglichkeit einer Abfuhr der anfallenden Nachzerfallsleistung aus dem Containment im Rahmen von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes mittlerweile nachgerüstet worden (BMUB 2016).

Im Rahmen von anlageninternen Notfallmaßnahmen kann in der Anlage KKB sowohl über das alternative Lagerbeckenkühlsystem als auch über eine neue, räumlich getrennte und fest verlegte Anschlussleitung Wasser in das Lagerbecken eingespeist werden. Die vom ENSI geforderte Möglichkeit das verdampfte Beckenwasserinventar aus dem Lagerbeckengebäude über den Fortluftkamin abzugeben zu können, ist allerdings noch in der Umsetzung.

Die noch nicht implementierte Möglichkeit, das verdampfte Beckenwasserinventar aus dem Lagerbeckengebäude im Rahmen des anlageninternen Notfallschutzes über den Fortluftkamin abzugeben zu können, stellt aus unserer Sicht bis zur endgültigen Umsetzung der Maßnahmen einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Hinsichtlich einer zusätzlichen Instrumentierung des Lagerbeckens hat die Aufsichtsbehörde bestätigt, dass eine entsprechende Nachrüstung geplant ist. Entgegen der ursprünglichen Zeitplanung wurde diese bis Ende 2014 noch nicht abgeschlossen sondern soll bis Ende 2017 fertiggestellt werden. Diese Instrumentierung soll der Störfallinstrumentierung der Anlage zugerechnet werden. Sie wäre damit vergleichbar der in deutschen Anlagen gemäß KTA 3502 (KTA 2012) erforderlichen Instrumentierung des Lagerbeckens. Da in (ENSI 2015g) bislang keine

Vorgaben für die Instrumentierung des Lagerbeckens enthalten sind, kann dies jedoch gegenwärtig nicht im Detail bewertet werden.

Die noch nicht implementierte Instrumentierung des Brennelement-Lagerbeckens im Rahmen der Störfallinstrumentierung stellt aus unserer Sicht bis zur endgültigen Umsetzung der Maßnahmen einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Die Lagerbecken sind im KKB in einem separaten Gebäude untergebracht, in den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Druckwasserreaktoren hingegen innerhalb des Containments im Reaktorgebäude. Dies gewährleistet einen zusätzlichen Schutz gegen mechanische Einwirkungen von außen und eine bessere Spaltproduktrückhaltung im Falle von Brennelementschäden. Der diesbezügliche Sachstand hat sich nicht verändert, auch wenn, wie vom ENSI festgestellt, das Lagerbeckengebäude zwischen massiven Gebäuden eingebaut und durch diese gut geschützt ist.

Vor diesem Hintergrund stufen wir die Unterbringung der Lagerbecken außerhalb des Containments in einem eigenen Lagerbeckengebäude weiterhin als sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB ein.

Gemäß (BMUB 2016) wurde für deutsche Anlagen, bei denen Brennelemente in Abklingbecken außerhalb des Sicherheitsbehälters, aber innerhalb des Reaktorgebäudes gelagert werden, eine Überprüfung gefordert, ob eine Aufkonzentration von Wasserstoff möglich ist. Gegebenenfalls sollten zur Vermeidung von Wasserstoffansammlungen vorzugsweise passiv wirkende Einrichtungen (z. B. katalytische Rekombinatoren) vorgesehen werden. In den hiervon betroffenen noch im Leistungsbetrieb befindlichen Anlagen wurden als sicherheitsgerichtete Maßnahme im Bereich des Brennelement-Lagerbeckens passive autokatalytische Wasserstoff-Rekombinatoren angebracht.

Demgegenüber sollen für die schweizerischen Kernkraftwerke Maßnahmen nicht im Bereich des mitigativen Notfallschutzes sondern im Bereich des präventiven Notfallschutzes verstärkt werden. Aufgrund der Unterbringung der abgebrannten Brennelemente in einem vom Reaktorgebäude und den dort befindlichen sicherheitstechnisch wichtigen, verfahrenstechnischen Einrichtungen getrennten Gebäudes ergibt sich aus dieser unterschiedlichen Vorgehensweise aus unserer Sicht kein bewertungsrelevanter Unterschied.



## 6. Elektrische Energieversorgung

Im Folgenden werden als Basis für die weitere Untersuchung zunächst die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) wiedergegeben. Daran anschließend werden, soweit zu diesem Themenfeld vorliegend, Erkenntnisse aus Darstellungen des Betreibers sowie der Aufsichtsbehörde zusammengefasst. Weiterhin wird u. a. auf Basis von (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) dargestellt, welche Auflagen bzw. Nachrüstungen mit Relevanz für die hier identifizierten Schwachstellen zwischenzeitlich beschlossen wurden.

### 6.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Die Grundausslegung deutscher Kernkraftwerke umfasst eine Notstromversorgung, mit der ein Ausfall und eine Unverfügbarkeit der externen Energieversorgung von bis zu 72 Stunden beherrscht werden. Der (n+2) Redundanzgrad der Notstromversorgung stellt auch unter Berücksichtigung eines Einzelfehlers und eines gleichzeitig auftretenden Instandhaltungsfalles eine ausreichende Versorgung der verfahrenstechnischen Einrichtungen sicher. Die Anlagen verfügen mindestens über Batteriekapazitäten, um einen zweistündigen Station Blackout zu beherrschen.

Für die in deutschen Anlagen vorhandenen Reserven hat die RSK festgestellt, dass in allen noch in Betrieb befindlichen Anlagen eine zusätzliche, diversitäre und redundante Notstromanlage für die Sicherheitseinrichtungen vorhanden ist. Diese Notstromanlage ist mindestens einzelfehlerfest (n+1) und gegen seltene Einwirkungen von außen wie einen Flugzeugabsturz ausgelegt.

Die Notstromerzeugungsanlagen des KKB sind durch ein erhebliches Maß an Diversität gekennzeichnet. Über die beiden Stränge des Wasserkraftwerks sowie das Notstand-Notstromdieselaggregat stehen je Block (n+2) Redundanten mit einer Kapazität von je 100% zur Verfügung (3 x 100%). Hinzu kommen die leistungsschwächeren Flutdiesel, deren Kapazität, soweit anhand der vorliegenden Unterlagen erkennbar, für die Beherrschung des reinen Notstromfalles ausgehend vom Leistungsbetrieb und Stillstand ausreichend ist. Weiterhin sind die Notstromerzeugungsanlagen nicht von einer gemeinsamen Kühlwasserversorgung abhängig sowie unabhängig vom Nebenkühlwassersystem, was aus unserer Sicht als sicherheitstechnisch vorteilhaft anzusehen ist.

Die Zahl der im KKB verfügbaren Stränge vermindert sich bei bestimmten übergreifenden Einwirkungen von Innen und Außen. So verbleibt bei einer Zerstörung des Ostteils des Maschinenhauses oder einem Sicherheitserdbeben im KKB pro Block nur das Notstand-Notstromdieselaggregat zur Notstromversorgung der Anlage. Die Auslegung der noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen ist diesbezüglich sicherheitstechnisch deutlich günstiger, da insgesamt acht gegen Erdbeben und externe Überflutung ausgelegte Notstromdieselaggregate (je vier Dieselaggregate des D1- und D2-Netzes) verfügbar bleiben. Weiterhin sind in den deutschen Anlagen im Maschinenhaus, das eine größere Zahl hochenergetischer Komponenten enthält, keine relevanten Anlagen zur Notstromversorgung (Schaltanlagen, Dieselaggregate) aufgestellt. Dies ist aus unserer Sicht ebenfalls als sicherheitstechnischer Vorteil zu werten.

Nach Realisierung des Projekts AUTANOVE ergibt sich eine Verbesserung der Verfügbarkeit von Notstromerzeugungsanlagen bei den o.g. übergreifenden Einwirkungen von Innen und Außen, da die AUTANOVE Diesel in einem eigenen Gebäude erdbebenfest und flutsicher untergebracht sein werden. Im Erdbebenfall scheint, soweit auf Basis der vorliegenden Unterlagen erkennbar, dann

pro Block eine 2 x 100% Versorgung zu bestehen, da zwar alle drei Dieselaggregate aber nur zwei Notstromschienen erdbebenfest ausgeführt sein werden. Eine blockweise Überlagerung von Einzelfehler und Reparaturfall mit einem Erdbeben würde dann im Gegensatz zu den deutschen Anlagen nicht beherrscht. Eine Bewertung, ob die Notstromversorgung im KKB abgesehen von der Verfügbarkeit beim Sicherheitserdbeben dann gleichwertig mit derjenigen in deutschen Anlagen wäre, bedürfte vertiefter Prüfungen, die auf Basis der vorliegenden Unterlagen und im Rahmen dieser Stellungnahme nicht vorgenommen werden konnten.

Die für den Fall eines Station Blackout gemäß Darstellung des KKB vorgesehenen präventiven Notfallmaßnahmen sind vergleichbar mit denjenigen in deutschen Anlagen. Allerdings erfordert die sekundärseitige Druckentlastung im KKB ein Öffnen von Dampferzeugerabblaseventilen über eine Handkurbel. Demgegenüber kann die Öffnung der Abblaseventile in den deutschen Anlagen fernbetätigt erfolgen, solange Batteriestrom zur Verfügung steht. Dies stufen wir als sicherheitstechnischen Vorteil der deutschen Anlagen ein.

## 6.2. Darlegungen des Betreibers

Im März 2015 ging der Block 1 des Kraftwerks Beznau für eine geplante Revision vom Netz. In 120 Tagen sollten mehrere langfristig geplante Großprojekte in der Anlage umgesetzt werden. Dazu gehört auch der Aufbau der neuen, autarken Notstromversorgung (AUTANOVE). Der Betreiber stellt hierzu fest (axpo 2015a):

*„Mit der Inbetriebsetzung der zwei Notstromaggregate für Block 1 wird eine zusätzliche erdbeben- und überflutungssichere Notstromversorgung geschaffen. Diese wird diejenige des Wasserkraftwerks Beznau ablösen. In den zwei bereits fertiggestellten, gebunkerten, auch gegen Flugzeugabstürze geschützten Gebäuden sind insgesamt vier leistungsstarke Dieselaggregate inklusive Hilfssystemen und zugehöriger Infrastruktur für eine Autarkiezeit von sieben Tagen Volllastbetrieb untergebracht.“*

Gemäß (Richner 2016) wurden in der Revision 2015 im Rahmen des Projekts AUTANOVE die bisherige Notstromversorgung aus dem Wasserkraftwerk Beznau sowie von zwei 380-V-Flutdieseln durch zwei neue, seismisch qualifizierte Notstromdieselgeneratoren pro Block ersetzt. Des Weiteren erfolgt die Installation einer Grundwasser- und einer Sperrwasserpumpe zum Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren Strangs der Kernkühlung.

An intern in der Anlage Beznau vorhandenen Einrichtungen werden von (Richner 2016) genannt:

- Zwei AM-Dieselgeneratoren mit je 890 kW Leistung. Jeweils eines dieser Aggregate ist einem Block der Anlage KKB fest zugeordnet und zur Einspeisung in das jeweilige Notstandsystem bestimmt. Die Einspeisepunkte stellen zugleich die Einspeisemöglichkeit für die weiteren mobilen Dieselgeneratoren aus dem Lager Reitnau dar. Durch eine elektrische Querverbindung zwischen den beiden Blöcken könne die Versorgung für beide Blöcke durch einen der AM-Dieselgeneratoren gewährleistet werden. Die beiden Generatoren sind räumlich getrennt und auf unterschiedlichen Höhenkoten aufgestellt.
- Das vorhandene Feuerwehrmaterial wurde aus dem nicht erdbebensichern Feuerwehrgebäude in zwei neue, seismisch robuste Zelte verbracht und um eine weitere Feuerwehrrampe aus dem externen Lager Reitnau ergänzt.
- Betriebs- und Hilfsstoffe in der Form von Diesel-Treibstoff, Treibstoffpumpen sowie von Borsäure und Löschwasserbecken.

Bezüglich der externen Verfügbarkeit von mobilen Einrichtungen (Dieselgeneratoren, Feuerweerpumpen, Steuerluftkompressoren etc.) verweist (Richner 2016) auf das für die schweizerischen Anlagen gemeinsam verfügbare externe Lager Reitnau, welches in Reaktion auf eine Forderung des ENSI nach Fukushima eingerichtet wurde. Im externen Lager Reitnau werden fünf weitere Feuerweerpumpen, drei Dieselgeneratoren mit einer Leistung von 200 kW und zwei weitere mit einer Leistung von 120 kW sowie Betriebs- und Hilfsstoffe, Strahlenschutzrüstung und weitere Ausrüstung gelagert.

Mobile Einrichtungen aus dem Lager Reitnau seien in 6 bis 10 Stunden auf den Anlagen verfügbar. Zur Überbrückung dieses Zeitraums mit auf der Anlage vorhanden (mobilen) Einrichtungen sei in Beznau auch das interne Lager ertüchtigt worden. Das externe Lager Reitnau stelle daher eine Redundanz dar bzw. würde für den mittel- und langfristigen Ersatz von Betriebsstoffen benötigt. Die mobilen Einrichtungen werden im Rahmen spezieller Accident-Management-Vorschriften (AM-Vorschriften) im KKB eingesetzt.

Hinsichtlich einer elektrischen Versorgung von Einrichtungen mit mobilen Generatoren seien Einspeisestellen in das Notstandssystem und in einzelne Nicht-Notstandssystem-Schienen vorhanden.

### 6.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

Gemäß (ENSI 2016i) standen bis zur Umsetzung des Projekts AUTANOVE die Wasserkraft-Generatoren des HKB immer unterbrechungsfrei für die Einspeisung von Notstrom ins KKB zur Verfügung. Ihre Leistung reichte aus, um bei einem Auslegungsstörfall im Block 1 die Stränge 3 und 4 zu versorgen und um gleichzeitig im Block 2 die Grundlast der dortigen Stränge 3 und 4 abzudecken. Bei Hochwasser konnte die benötigte Leistung bis zu einem maximalen Durchfluss der Aare von 2330 m<sup>3</sup>/s genutzt werden. In der Vergangenheit kam es allerdings bereits zu einer Unterschreitung der geforderten minimalen Notstromleistung des Hydrowerks wegen extremer Hochwasserführung der Aare (Ereignis 07-0001).

Gemäß (ENSI 2016i) besteht die Möglichkeit einer handgesteuerten 6-kV-Querverbindung zwischen den Notstand-Notstromschienen der beiden Blöcke. Damit können Verbraucher in beiden Notstandgebäuden von einer Dieselgruppe gleichzeitig versorgt werden. Da die Dieselgruppen jedoch nur für die Versorgung eines Stranges ausgelegt sind, sind Steuerfunktionen wirksam, welche Überlast vermeiden.

### 6.4. Auflagen und Nachrüstungen

Im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde die Notstromversorgung der Anlage Beznau umgerüstet, vgl. (Brettner et al. 2012, Kap. 4.2.3). Anlass für das Projekt AUTANOVE zur Stärkung der Notstromversorgung der Anlage Beznau war eine Schutzabschaltung eines Notstandsdiesels im Block 1 bei gleichzeitiger Nichtverfügbarkeit des Notstandsdiesels des Blocks 2 wegen Wartungsarbeiten und der 50 kV-Einspeisung beider Blöcke im Jahr 2007 (ENSI 2016i).

Nach (ENSI 2016i) wurde das Projekt für den Block 2 des KKB in 2015 mit einem abschließenden Funktionstest abgeschlossen. Für Block 1 sei geplant, die Integration in 2016 abzuschließen. Im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde demnach die bisherige Notstromversorgung durch die insgesamt zwei Flutdiesel sowie das hydraulische Kraftwerk Beznau durch zwei Dieselgeneratorgruppen für jeden Block des KKB ersetzt. Die Dieselgeneratorgruppen sind seismisch qualifiziert und gegen Überflutung geschützt in zwei neu errichteten Gebäuden aufgestellt. Weiterhin wurde je eine Notstromschiene pro Block aufgebaut, von der die

sicherheitstechnisch relevanten Verbraucher eines Sicherheitsstranges versorgt werden. Auch die Versorgung der Notspeisewasserpumpe erfolgt nun durch die geschützte, neue Notstromschiene.

Gemäß (ENSI 2012b) soll mit dem Projekt AUTANOVE eine Stärkung der vierten Ebene der Stromversorgung durch Ersatz der nicht seismisch qualifizierten Notstromversorgung durch jeweils zwei neu errichtete Notstromdiesel pro Block erreicht werden. Mit der Inbetriebnahme der AUTANOVE Dieselgruppen verlieren die beiden pro Block vorhandenen Flutdiesel ihre sicherheitstechnische Bedeutung und werden gemäß (ENSI 2016i) eliminiert.

Für die Beherrschung eines auslegungsüberschreitenden, langandauernden Ausfalls der Stromversorgung wurden gemäß (ENSI 2012a) von den Betreiber der schweizerischen KKW bereits mobile dieselgetriebene Generatoren größerer Leistung an den Standorten aufgestellt bzw. es war geplant, dies noch in 2012 auszuführen. Gemäß (ENSI 2016i) wurden zwei Accident-Management-Dieselaggregate (je 890 kW) in 2011 beschafft und in 2012 durch vorbereitete Anschlüsse eingebunden. Gemäß (ENSI 2016i) befindet sich hiervon ein Aggregat auf dem Dach des Notstandgebäudes Block 1 und ein weiterer auf dem Kraftwerksareal.

In (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.2) verweist ENSI darauf, dass in Folge des EU-Stresstests die sechste Ebene der Stromversorgung des KKB (mobile Einrichtungen zur Stromversorgung am Standort) gestärkt und eine siebente Ebene der Notstromversorgung durch die Einführung des externen Lagers Reitnau ergänzt wurde.

Gemäß (ENSI 2013a) hat das ENSI Inspektionen der in den schweizerischen Anlagen vorhandenen Maßnahmen und Strategien bei einem langanhaltenden Ausfall der Stromversorgung durchgeführt. In diesem Zusammenhang untersucht das ENSI auch die von den Betreibern vorgesehenen Maßnahmen zur Streckung der Batterielaufzeiten. Gemäß (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.3) haben die Überprüfungen ergeben, dass für die Batterieversorgung des Sicherheitssystems die Kapazitäten der Batterien bis zur Nachlademöglichkeiten durch AM-Diesel ausreichend sind. Für weitere, sicherheitsrelevante Batterien sei dies in den meisten Fällen der Fall. Nach (ENSI 2014c) fordert das ENSI von den schweizerischen Anlagen eine Mindestverfügbarkeit der Batterien über 4 Stunden, damit Maßnahmen zur Wiederherstellung der Energieversorgung im Rahmen der Notfallmaßnahmen ergriffen werden können.

Weiterhin wurden nach (ENSI 2013a) die vorgehaltenen Mengen an Betriebsmitteln wie Dieseltreibstoff und Schmieröl daraufhin überprüft, ob ein autarker Betrieb der vorhandenen mobilen Einrichtungen für sieben Tage gewährleistet ist. Gemäß (ENSI 2015a, OP5-1) werden Folgemaßnahmen mit Blick auf die Gesamtstrategie zum Einsatz von mobilen AM-Dieseln im Falle eines SBO im Rahmen der laufenden Aufsicht weiter verfolgt.

Das ENSI plante darüber hinaus, erweiterte Vorgaben für die Notstromversorgung der im Bereich schwerer Unfälle erforderlichen Instrumentierung sowie gegebenenfalls weiterer Einrichtungen des präventiven und mitigativen Notfallschutzes zu erlassen. Nach (ENSI 2014a) wurden derartige Anforderungen in 2013 diskutiert und in einen Entwurf einer neuen Richtlinie (ENSI-G02) eingebracht, jedoch noch nicht verabschiedet. Auch in (ENSI 2015a) wird auf den Entwurf der Richtlinie ENSI-G02 verwiesen. Die Richtlinie wurde mit (ENSI 2016b) veröffentlicht.

(ENSI 2012a) verweist auf das von den Betreibern gemeinsam eingerichtete externe Lager Reitnau. Hierzu wurde von den Betreibern am 11.01.2012 ein Betriebskonzept vorgelegt. Das ENSI verlangte bis zum 31.12.2012 von den Betreibern die Nachrüstung bzw. Anpassung extern zugänglicher Anschlüsse für die mobilen Einsatzmittel. Das ENSI selbst sah bis zum 30.09.2012 eine Inspektion des Lagers und die Prüfung des Gesamtkonzepts vor. Gemäß (ENSI 2013a) erfolgte im September 2012 eine Inspektion des Lagers, mit einem positiven Ergebnis hinsichtlich

der Einsatzbereitschaft und Zugänglichkeit der mobilen Einrichtungen in Reitnau. Eine Weiterentwicklung des Konzepts des externen Lagers auf der Basis von durchzuführenden Notfallübungen sowie der noch offenen Anpassungen der Kernkraftwerke an den Einsatz mobiler externer Hilfsmittel lies aus Sicht des ENSI die Anpassung und Weiterentwicklung des Konzepts des externen Lagers in den folgenden Jahren erwarten.

Mit (ENSI 2013b) hat ENSI das von den Betreibern vorgelegte Konzept zum externen Lager Reitnau bewertet und kommt zu dem Schluss, das Reitnau für Zwecke der Lagerung von Geräten und Hilfsstoffen eines für schwere Unfälle erweiterten Accident Managements (AM) der schweizerischen Kernkraftwerke als taugliche Einrichtung einzuschätzen ist. Gemäß (ENSI 2016g) wurde im Rahmen einer Gesamtnotfallübung 2015 festgestellt, dass Erkenntnisse aus einer früheren Übung umgesetzt wurden und sich das Einsatzkonzept bewährt hat. Weiterhin sind die Zuständigkeiten im Notfallstab für die Anforderung der Einsatzmittel aus dem Lager Reitnau ordnungsgemäß in die anlagenspezifischen Notfallanweisungen aufgenommen worden.

Als ein wichtiger offener Punkt wurde bereits im schweizerischen Länderbericht zum EU-Stresstest die Wiederherstellung der Containment-Integrität während Revisionszuständen unter den Bedingungen eines vollständigen Ausfalls der Wechselstromversorgung (SBO) identifiziert. Dieser Punkt wurde im Rahmen des Europäischen Peer Review Prozesses für die schweizerischen Anlagen gemäß (ENSI 2014a) nochmals betont. Daher hat das ENSI die Frage der Wiederherstellung der Containment-Integrität während SBO als einen Schwerpunkt für das Jahr 2014 festgelegt. Die Betreiber sollten hierzu bis Ende des Jahres 2014 klärende Unterlagen einreichen.

Gemäß (ENSI 2015a) wurden von allen Betreibern vor Ende Oktober 2014 Unterlagen zu den notwendigen und verfügbaren Handlungszeiten für ein Schließen des Containments unter SBO-Bedingungen vorgelegt und Verbesserungspotenziale aufgezeigt. Eine Prüfung dieser Unterlagen war für das Jahr 2015 vorgesehen. Gemäß (ENSI 2016g) kann bei einem Ausfall der gesamten Wechselstromversorgung der Containmentabschluss während des Revisionsstillstands in KKB mit den technischen Hilfsmitteln rechtzeitig sichergestellt werden, bevor Anlagenzustände erreicht werden, bei denen es zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe kommen könnte. Möglichkeiten zur Verbesserung des Containmentabschlusses wurden durch die Betreiber der Schweizer Kernkraftwerke identifiziert. Diese betreffen insbesondere das schnellere Schließen des Containment-Materialtors. Die Umsetzung der Maßnahmen verfolgt das ENSI im Aufsichtsverfahren.

Mit Blick auf die Raumkühlung bei einem Ausfall der Lüftungsanlagen im Falle eines SBO stellt ENSI in (ENSI 2012b) fest, dass derartige Auswirkungen bislang nicht vollumfänglich untersucht wurden und ENSI die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen prüfen werde. In (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.8) stellt ENSI ebenso wie in (ENSI 2012b) fest, dass im Rahmen von Prüfungen die Funktionsfähigkeit der Notstandssysteme für zumindest mehrere Tage gezeigt wurde und verweist darauf, dass im Rahmen von AM-Maßnahmen mobile Einrichtungen wie Feuerwehropumpen oder AM-Diesel verwendet würden, die gegenüber den stationären Einrichtungen eine deutlich geringere Abwärmeproduktion aufweisen, so dass ENSI auch von einer längerfristigen Verfügbarkeit solcher Ausrüstungen auch ohne zusätzliche Raumkühlung ausgeht.

Die Anlage KKB soll im Falle eines vollständigen Ausfalls der Wechselstromversorgung in Rahmen von Notfallmaßnahmen durch sekundärseitige Druckentlastung und anschließende Bespeisung eines Dampferzeugers mit Hilfe einer mobilen Feuerlöschpumpe abgefahren werden können. (ENSI 2016i) stellt hierzu fest, dass die vom Betreiber vorgelegten Analysen für Westinghouse-Anlagen hinsichtlich der angenommenen Einspeiseparameter der mobilen Pumpen nicht der Vor-

Ort Situation des KKB entsprechen. Um derartige Zusammenhänge angemessen für das KKB beurteilen zu können, fordert das ENSI daher weitere anlagenspezifische Analysen.

## 6.5. Stellungnahme

In der Anlage KKB sind eine Netzanbindung sowie eine Reservenetzanbindung zur elektrischen Energieversorgung des Eigenbedarfssystems vorhanden. Weiterhin ist ein Inselbetrieb der Anlage durch Lastabwurf auf Eigenbedarf grundsätzlich möglich. Dies entspricht auch den im Rahmen der Grundausslegung der deutschen Anlagen vorhandenen Einrichtungen.

Allerdings ist durch die externe Netzanbindung an das 220 kV-Netz sowie im Inselbetrieb der Anlage KKB keine Versorgung des Notstandschiene des KKB möglich, vgl. die Darstellung in (Brettner et al. 2012), so dass diese Einspeisemöglichkeiten nur für die (n+1) redundanten Einrichtungen des ursprünglichen Sicherheitssystems verfügbar sind.

Die Anlage KKB verfügt nicht über einen unabhängigen dritten Netzanschluss, wie dies bei den deutschen Anlagen der Fall ist, vgl. ebenfalls (Brettner et al. 2012).

Für die deutschen Kernkraftwerke umfasst die Grundausslegung wie bereits in (Brettner et al. 2012) dargestellt eine Notstromversorgung, mit der ein Ausfall und eine Unverfügbarkeit der externen Energieversorgung von bis zu 72 Stunden beherrscht werden. Der (n+2) Redundanzgrad der Notstromversorgung stellt auch unter Berücksichtigung eines Einzelfehlers und eines gleichzeitig auftretenden Instandhaltungsfalles eine ausreichende Versorgung der verfahrenstechnischen Einrichtungen sicher.

Wie weiterhin in (Brettner et al. 2012) dargestellt, gilt für die vorhandenen Reserven, dass in allen noch in Betrieb befindlichen deutschen Anlagen eine zusätzliche, diversitäre und redundante Notstromanlage für die Sicherheitseinrichtungen vorhanden ist. Diese Notstromanlage ist mindestens einzelfehlerfest (n+1) und gegen seltene Einwirkungen von außen wie einen Flugzeugabsturz ausgelegt.

Mit der Umsetzung der Nachrüstungen im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde die bisherige Notstromversorgung der Anlage KKB durch das Wasserkraftwerk und die Flutdiesel ersetzt. Für jeden Block der Anlage KKB stehen nunmehr zwei Notstromdieselaggregate inklusive Hilfssystemen und zugehöriger Infrastruktur zur Versorgung der zwei ursprünglichen Stränge des Sicherheitssystems zur Verfügung. Beide Notstromdieselaggregate sind auch bei Hochwasser verfügbar, durch die Errichtung eines neuen, erdbebensicheren Strangs zur Energieverteilung ist damit zukünftig auch ein Strang des ursprünglichen Sicherheitssystems beim bisherigen Bemessungserdbeben verfügbar, vgl. hierzu jedoch auch Kap. 3. Zusätzlich zu diesen beiden Notstromdieselaggregaten steht wie bisher die Versorgung des Notstandsystems durch jeweils einen Notstanddiesel pro Block zur Verfügung. Dies entspricht ohne die Berücksichtigung von Möglichkeiten der Blockstützung einem blockweisen (n+2) Redundanzgrad in der Notstromversorgung.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch die Schaffung von Querverbindungen eine elektrische Energieversorgung der verfahrenstechnischen Einrichtungen eines Blocks über die Notstrom- oder Notstandnotstromgeneratoren des anderen Blocks herzustellen. Dabei bestehen aber ggf. Einschränkungen hinsichtlich der jeweils versorgbaren Einrichtungen, da z. B. die Notstanddiesel eines Block nicht in der Lage sind, alle verfahrenstechnischen Einrichtungen von zwei Notstandsträngen gleichzeitig zu versorgen.

Hinsichtlich der vorhandenen Diversität der Notstromerzeugungsanlagen ist die Situation in der Anlage KKB damit vergleichbar zum Sicherheitsstatus der deutschen Anlagen (jeweils Generatoren des Notstrom- und des Notstandsnotstromsystems).

Hinsichtlich des verfügbaren Redundanzgrads ist dieser bei Ereignissen, die nur einen Block der Anlage KKB betreffen, mit dem (n+2)-Redundanzgrad der blockeigenen Versorgung bei Kreditierung der zusätzlichen Möglichkeit der redundanten Blockstützung durch den Nachbarblock ebenfalls vergleichbar. Allerdings stünde die zusätzliche Versorgung durch den Nachbarblock nur nach Durchführung von Handmaßnahmen und nicht, wie in den deutschen Anlagen, durch eine automatische Anforderung kurzfristig zur Verfügung. Für Ereignisse, die beide Blöcke gleichzeitig betreffen, wäre der verfügbare Redundanzgrad der Notstromerzeugungsanlagen weiter reduziert. Insbesondere bei Bemessungserdbeben stünden pro Block nur noch (n+1) Stränge der Notstrom- und Notstandsnotstromversorgung zur Verfügung. Demgegenüber verbleibt in den deutschen Anlagen immer die Versorgungsmöglichkeit aus der (n+2)-redundanten Notstrom- und der mindestens (n+1)-redundanten Notstandsnotstromversorgung.

Auf dieser Basis bewerten wir die Grundausslegung der elektrischen Energieversorgung in KKB als nicht gleichwertig zur Grundausslegung der elektrischen Energieversorgung in den deutschen Anlagen. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Hinsichtlich der Verfügbarkeit von Betriebsmitteln auf der Anlage ergibt sich für die deutschen Anlagen eine Autarkiezeit bei einem Verlust der externen Stromversorgung von 7 Tagen (BMUB 2014). Dies entspricht auch den für die Notstromversorgung der Anlage KKB angegebenen und von ENSI bestätigten Autarkiezeiten, so dass sich hieraus kein bewertungsrelevanter Unterschied ergibt.

Bereits vor dem Ereignis in Fukushima war in allen deutschen Druckwasserreaktoren im Rahmen der anlageninternen Notfallmaßnahmen eine Prozedur zur Nutzung einer auf der Anlage befindlichen mobilen Pumpe für eine sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung der Dampferzeuger vorgesehen. Weiterhin waren anlagenspezifisch organisatorische Vorkehrungen zur externen Unterstützung durch Teams des Betreiberunternehmens, des Herstellers der Anlage, des Kerntechnischer Hilfsdienstes sowie weiterer regionaler und lokaler Katastrophenschutzorganisationen getroffen worden (BMU 2012).

Weitere, in den deutschen Anlagen geforderte wesentliche Maßnahmen und Nachrüstungen umfassen nach (BMUB 2016):

- Die Sicherstellung einer 10-Stunden Autarkiezeit im Falle eines Station Blackout durch Erhöhung der Batterielaufzeiten oder Bereitstellung einer mobilen Notstromdieselversorgung (BMUB 2016, N-1).
- Die Bereitstellung eines mobilen Notstromdieselaggregats, um unter den Bedingungen auslegungsüberschreitender Ereignisse mit einem Verlust der elektrischen Energieversorgung auf der Anlage die Versorgung mit Wechselstrom innerhalb der verfügbaren Karenzzeiten von 10 Stunden wieder herstellen zu können. Die Kapazität dieses Notstromdieselaggregats muss für die Systeme ausreichen, die erforderlich sind, um die Anlage abzufahren und die Nachwärme aus dem Reaktor und Brennelement-Lagerbecken abzuführen (BMUB 2016, N-2).

Bereits in (BMUB 2014) wird bestätigt, dass für alle deutschen Druckwasserreaktoren mit der Genehmigung zum Leistungsbetrieb eine 10-Stunden Autarkiezeit umgesetzt ist. Weiterhin wurden in allen Reaktoren mobile Notstromdieselaggregate sowie zugehörige Anschlussstellen bereitgestellt, mit denen die erforderlichen Systeme zum Abfahren der Anlage und zur Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktor und Brennelement-Lagerbecken versorgt werden können.

Hinsichtlich der Möglichkeit der Gebäudekühlung auch unter Bedingungen des Station Blackout wurde in den deutschen Anlagen durch die Nachrüstung einer diversitären Wärmesenke bzw. einer verkürzten Nachkühlkette Maßnahmen ergriffen, siehe Kap. 7.

Mit der Ergänzung der auf dem Anlagengelände des KKB befindlichen mobilen Einrichtungen sowie der Einrichtung des externen Lagers Reitnau durch die schweizerischen Betreiber stehen vergleichbare Einrichtungen auch in der Anlage KKB zur Verfügung bzw. sollen innerhalb einer Karenzzeit von wenigen Stunden auf das Anlagengelände verbringbar sein.

Hinsichtlich der für anlageninterne Notfallmaßnahmen auf dem Anlagengelände vorhandenen Einrichtungen sowie innerhalb einer Karenzzeit von wenigen Stunden auf das Anlagengelände transportierbaren Einrichtungen zur Wiederherstellung einer Wechselstromversorgung und zur Durchführung einer autarken Bespeisung des Brennelement-Lagerbeckens bestehen damit keine bewertungsrelevanten Unterschiede.

Soweit aus den verfügbaren Unterlagen erkennbar erfordert die sekundärseitige Druckentlastung im KKB weiterhin ein Öffnen von Dampferzeugerabblaseventilen über eine Handkurbel. Demgegenüber kann die Öffnung der Abblaseventile in den deutschen Anlagen fernbetätigt erfolgen, solange Batteriestrom zur Verfügung steht. Weiterhin bestehen Unsicherheiten bezüglich des Nachweises der Wirksamkeit der vorgesehenen Maßnahmen zur Dampferzeugerbespeisung mit mobilen Feuerlöschpumpen für die Vor-Ort-Situation im KKB. Dies stufen wir als einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB ein.

## 7. Kühlwasser

Im Folgenden werden als Basis für die weitere Untersuchung zunächst die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) wiedergegeben. Daran anschließend werden, soweit zu diesem Themenfeld vorliegend, Erkenntnisse aus Darstellungen des Betreibers sowie der Aufsichtsbehörde zusammengefasst. Weiterhin wird u. a. auf Basis von (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) dargestellt, welche Auflagen bzw. Nachrüstungen mit Relevanz für die hier identifizierten Schwachstellen zwischenzeitlich beschlossen wurden.

### 7.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Die Grundauslegung deutscher Anlagen umfasst ein Nebenkühlwassersystem mit einem (n+2) Redundanzgrad, das auch bei Einwirkungen von außen wie Erdbeben und Hochwasser verfügbar ist.

Das Nebenkühlwassersystem des KKB mit Wärmeabfuhr an die Aare weist keine durchgehende räumliche Trennung auf und steht bei EVA Ereignissen (Erdbeben, externe Überflutung) nicht gesichert zur Verfügung. Dies stellt aus unserer Sicht einen sicherheitstechnischen Nachteil im Vergleich zu dem im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR Anlagen dar.

Für die in deutschen Anlagen vorhandenen Reserven hat die RSK festgestellt, dass in allen noch in Betrieb befindlichen Anlagen ein Ausfall des Nebenkühlwassersystems mit Notfallmaßnahmen beherrscht werden kann. Darüber hinaus wurde insbesondere für die in Baden-Württemberg noch in Betrieb befindlichen Anlagen GKN II und KKP 2 festgestellt, dass zusätzliche diversitäre (andere Wärmesenke, aktive Komponenten) und redundante (n+1) Nebenkühlwasserstränge vorhanden sind.

Im KKB stehen mehrere Kühlketten unter Nutzung der Wärmesenken Aare, Notbrunnen und Notstand-Brunnen für eine Abfuhr der Nachwärme aus dem Reaktorkern und den Brennelementlagerbecken sowie für eine Kühlung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten zur Verfügung. Die einzelnen Kühlketten erfüllen dabei z.T. unterschiedliche Aufgaben, sie sind also nicht vollumfänglich redundant zueinander.

Die Abfuhr der Verlustwärme aus dem Wasser-/Dampfkreislauf und aus der Komponentenkühlung erfolgt im Leistungsbetrieb an die Aare. Dasselbe gilt für den ungestörten Anlagenstillstand mit und ohne Verfügbarkeit der Dampferzeuger.

Darüber hinaus können die Abfuhr der Nachzerfallswärme und die Komponentenkühlung im Stillstand zusätzlich mittels Brunnenwasser erfolgen. Bei verfügbaren Dampferzeugern stehen dafür zwei Brunnen (Notbrunnen, Notstand-Brunnen) mit den jeweils davon versorgten verfahrenstechnischen Systemen zur Verfügung. Bei unverfügbaren Dampferzeugern steht nur der Notstand-Brunnen mit den davon versorgten verfahrenstechnischen Systemen zur Verfügung. Hintergrund ist, dass vom Notbrunnen nur Systeme zur Dampferzeugerbespeisung versorgt werden.

Das KKB verfügt mit der Aare und dem aus den Brunnen geförderten Grundwasser über zwei diversitäre Wärmesenken. Dies gilt auch für den Anlagenstillstand mit unverfügbaren Dampferzeugern. Diesbezüglich geht die Auslegung des KKB über diejenige einzelner noch im Leistungsbetrieb befindlicher deutscher DWR Anlagen hinaus, was wir als sicherheitstechnischen Vorteil einstufen. Die Anlagen GKN II und KKP 2 verfügen allerdings beide über diversitäre Wärmesenken.

Ereignisabhängig stehen nicht alle Kühlketten auslegungsgemäß zur Verfügung. Im Falle der Ereignisse Turbinenversagen im Maschinenhaus und Sicherheitserdbeben steht gesichert nur die Notstand-Kühlkette zur Verfügung. Dasselbe gilt für die externe Überflutung mit unverfügbaren Dampferzeugern. Da bei den genannten Ereignissen im KKB auslegungsgemäß keine diversitären Wärmesenken verfügbar sind und die Notstand-Kühlkette pro Block nur einsträngig ausgeführt ist, stufen wir die Auslegung des KKB für diese Fälle aufgrund des geringeren Redundanzgrades als sicherheitstechnisch nachteilig im Vergleich zu den noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutsche DWR Anlagen ein. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu den Anlagen GKN II und KKP 2, die mindestens für den Großteil dieser Fälle über diversitäre Wärmesenken verfügen.

Die im Rahmen des Projekts AUTANOVE vorgesehenen Nachrüstungen führen dazu, dass im Stillstand mit verfügbaren Dampferzeugern neben dem Notstandsystem ein weiterer EVA-fester Strang zur Dampferzeugerbespeisung zur Verfügung steht. Hierbei wird ebenfalls Brunnenwasser verwendet. Somit führt das Projekt dazu, dass der Redundanzgrad im EVA-Fall steigt, hinsichtlich der Verfügbarkeit diversitärer Wärmesenken ergeben sich hingegen keine Änderungen.

## 7.2. Darlegungen des Betreibers

Mit dem Schreiben (Karrer 2012) nimmt der Betreiber des Kernkraftwerks Beznau in knapper Form zum Gutachten des Öko-Instituts von 2012 (Brettner et al. 2012) Stellung. Er verweist darauf, dass wichtige Sicherheitssysteme in der Studie nicht berücksichtigt seien und nennt als Beispiel dafür die Diversität der Kühlmöglichkeiten. Genauere Ausführungen hierzu enthält das Schreiben jedoch nicht.

Gemäß (Richner 2016) wurden in der Revision 2015 weiterhin im Rahmen des Projekts AUTANOVE die Installation einer Grundwasser- und einer Sperrwasserpumpe zum Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren Strangs der Kernkühlung umgesetzt. Die Nachrüstungen umfassen auch den Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren, aus dem Notstandsystem versorgten Kühlsystems für das Brennelementlagerbecken.

Bezüglich der Verfügbarkeit von mobilen Einrichtungen (Feuerwehropumpen, etc.) verweist (Richner 2016) insbesondere auf das für die schweizerischen Anlagen gemeinsam verfügbare externe Lager Reitnau, welches in Reaktion auf eine Forderung des ENSI nach Fukushima eingerichtet wurde. Mobile Einrichtungen aus dem Lager Reitnau seien in 6 bis 10 Stunden auf den Anlagen verfügbar. Zur Überbrückung dieses Zeitraums mit auf der Anlage vorhanden (mobilen) Einrichtungen sei in Beznau auch das interne Lager ertüchtigt worden. Das externe Lager Reitnau stelle daher eine Redundanz dar bzw. würde für den mittel- und langfristigen Ersatz von Betriebsstoffen benötigt. Die mobilen Einrichtungen werden im Rahmen spezieller Accident-Management-Vorschriften (AM-Vorschriften) im KKB eingesetzt.

An intern in der Anlage Beznau vorhanden Einrichtungen werden von (Richner 2016) u. a. genannt:

- Das vorhandene Feuerwehrmaterial wurde aus dem nicht erdbebensicheren Feuerwehrgebäude in zwei neue, seismisch robuste Zelte verbracht und um eine weitere Feuerwehropumpe aus dem externen Lager Reitnau ergänzt.
- Betriebs- und Hilfsstoffe in der Form von Diesel-Treibstoff, Treibstoffpumpen sowie von Borsäure und Löschwasserbecken.

Im externen Lager Reitnau werden darüber hinaus fünf weitere Feuerwehropumpen, sowie Betriebs- und Hilfsstoffe, Strahlenschutzrüstung und weitere Ausrüstung gelagert.

### 7.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

In (ENSI 2016i) wird festgehalten, dass das Kaltabfahren der Anlage sowohl durch vorheriges Abkühlen über die Sekundärseite und danach weiter über die Notstands-Kaltfahrleitung als auch alternativ durch Feed & Bleed erfolgen kann. Beide Fahrweisen sind den Notstandsfunktionen zugeordnet.

### 7.4. Auflagen und Nachrüstungen

Nach (ENSI 2016i) wurde in 2013 die Rechenreinigungsanlage am Kühlwassereinlauf saniert. Weiterhin wurde durch Einbau eines neuen Wasseranschlusses und der zugehörigen Armaturen die Wasserversorgung des Nebenkühlwassersystems eines stillstehenden Blockes aus dem Zulaufkanal des laufenden Blockes möglich gemacht.

Im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde je eine Notstromschiene pro Block aufgebaut, von der die sicherheitstechnisch relevanten Verbraucher eines Sicherheitsstranges versorgt werden. Auch die Versorgung der Notspeisewasserpumpe erfolgt nun durch die geschützte, neue Notstromschiene. Weiterhin wurde im Rahmen dieses Projekts eine seismisch qualifizierte Nachspeisung der Notspeisewassertanks aus einem Grundwasserbrunnen nachgerüstet. Nach (ENSI 2016i) wurde das Projekt für den Block 2 des KKB in 2015 mit einem abschließenden Funktionstest abgeschlossen. Für Block 1 sei geplant, die Integration in 2016 abzuschließen.

Gemäß (ENSI 2016i) wurde im Rahmen des Notfallmanagements eine zusätzliche Bespeisungsmöglichkeit der primären Zwischenkühler durch den Einbau von neuen Feuerwehranschlussstutzen im Vorlauf zu jedem Kühler ermöglicht. Das ENSI hat die neuen Feuerwehranschlussstutzen als gleichwertige Ersatzmaßnahme zu der durch den Umbau entfallenen Notbespeisung des PRW-Systems mit Feuerlöschwasser bewertet.

### 7.5. Stellungnahme

Für die deutschen Kernkraftwerke umfasst die Grundausslegung wie bereits in (Brettner et al. 2012) dargestellt ein Nebenkühlwassersystem mit einem (n+2) Redundanzgrad, das auch bei Einwirkungen von außen wie Erdbeben und Hochwasser verfügbar ist.

Im Rahmen des Nationalen Aktionsplans (BMUB 2016, N-12) haben die Betreiber deutscher Anlagen

*„Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs, zur Stärkung der Zuverlässigkeit der Primären Wärmesenke im Hinblick auf den Eintritt von seltenen Einwirkungen von Außen und zur Beherrschung des Ausfalls der Primären Wärmesenke“*

durchzuführen. Gemäß (BMUB 2016) wurden für alle deutschen Druckwasserreaktoren mit der Genehmigung zu Leistungsbetrieb entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Mit den vorhandenen Maßnahmen sei eine ausreichende Vorsorge gegen gemeinsam verursachte Ausfälle der primären Wärmesenke getroffen.

Demgegenüber weist das Nebenkühlwassersystem des KKB mit Wärmeabfuhr an die Aare wie bereits in (Brettner et al. 2012) ausgeführt keine durchgehende räumliche Trennung auf und steht bei verschiedenen EVI und EVA Ereignissen (Notstromfall, Turbinenversagen, Erdbeben, externe Überflutung) nicht uneingeschränkt gesichert zur Verfügung. Bei Verlust des primären und sekundären Nebenkühlwassers aufgrund einer externen Überflutung des Anlagengeländes kann

über Handmaßnahmen eine Versorgung des sekundären Nebenkühlwassersystems durch den Notbrunnen aufgebaut werden, so dass die sekundärseitige Bespeisung der Dampferzeuger aufrechterhalten werden kann. Durch die Nachrüstungen im Rahmen des Projekts AUTANOVE ist auch im Erdbebenfall eine weitere Bespeisung eines Strangs des Notspeisesystems aus dem Notbrunnen und damit die sekundärseitige Wärmeabfuhr über diesen Strang gesichert. Die Kühlung des Brennelement-Lagerbeckens mit dem betrieblichen oder dem alternativen Beckenkühlsystem ist bei unverfügbarem Nebenkühlwasser nicht möglich.

In der Anlage KKB wurde durch eine Sanierung der Rechenreinigungsanlage am Kühlwassereinlauf sowie eine neu geschaffene Möglichkeit zur Nebenkühlwasserversorgung eines im Stillstand befindlichen Blocks aus dem Nachbarblock weitere Vorsorge gegen gemeinsam verursachte Ausfälle der primären Wärmesenke getroffen.

Die Einschränkungen in der ereignisspezifischen Verfügbarkeit der Nebenkühlwasserversorgung stellt aus unserer Sicht insbesondere für die Stillstandsphasen bei unverfügbaren Dampferzeugern und mit Blick auf die Lagerbeckenkühlung einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Insbesondere für die in Baden-Württemberg noch in Betrieb befindlichen Anlagen GKN II und KKP 2 haben wir in (Brettner et al. 2012) festgestellt, dass zusätzliche diversitäre (andere Wärmesenke, aktive Komponenten) und redundante (n+1) Nebenkühlwasserstränge vorhanden sind. Für die weiteren in deutschen Anlagen vorhandenen Reserven haben wir in (Brettner et al. 2012) festgestellt, dass in allen noch in Betrieb befindlichen Anlagen ein Ausfall des Nebenkühlwassersystems mit Notfallmaßnahmen beherrscht werden kann.

Gemäß (BMUB 2016, N-3) wurde weiterhin für alle Anlagen die Bereitstellung einer ultimativen Wärmesenke gefordert, die unabhängig von der primären Wärmesenke und zur Abfuhr der Nachzerfallsleistung und zur Komponentenkühlung ausreichend und bei auslegungsgemäß zu unterstellenden Einwirkungen von außen verfügbar ist. Darüber hinaus wurde zur Stärkung existierender Notfallmaßnahmen für die Abfuhr der Nachzerfallsleistung aus dem Reaktor und dem Brennelement-Lagerbecken insbesondere eine zusätzliche, gegen auslegungsüberschreitende Einwirkungen gesicherte mobile Pumpe zur Aufrechterhaltung des Zwischenkühlkreislaufs (BMUB 2016, N-4) gefordert.

In den deutschen Anlagen wurde gemäß (BMUB 2014) für alle Anlagen eine diversitäre ultimative Wärmesenke geschaffen. Auch wurde bei allen Reaktoren, bei denen eine diversitäre Versorgung des Zwischenkühlsystems bislang nicht möglich war, eine zusätzliche mobile Pumpe für den Aufbau einer verkürzten Nachkühlkette bereitgestellt (BMUB 2016). Damit ist neben der Abfuhr der Nachzerfallsleistung aus dem Reaktor und dem Brennelement-Lagerbecken auch die erforderliche Komponentenkühlung möglich.

Wie in (Brettner et al. 2012) dargestellt verfügt das KKB mit der Aare und dem aus den Brunnen geförderten Grundwasser über zwei diversitäre Wärmesenken. Die Abfuhr der Nachzerfallswärme und die Komponentenkühlung können mittels Brunnenwasser erfolgen. Bei verfügbaren Dampferzeugern stehen dafür zwei Brunnen (Notbrunnen, Notstand-Brunnen) mit den jeweils davon versorgten verfahrenstechnischen Systemen zur Verfügung. Bei unverfügbaren Dampferzeugern steht nur der Notstand-Brunnen mit den davon versorgten verfahrenstechnischen Systemen zur Verfügung, da vom Notbrunnen nur Systeme zur Dampferzeugerbespeisung versorgt werden. Eine Kühlung des Brennelement-Lagerbeckens über eine diversitäre Wärmesenke wird erst nach Abschluss der Nachrüstung des als Sicherheitssystem qualifizierten unabhängigen Beckenkühlstrangs möglich sein, vgl. hierzu Kap. 5.

In der Anlage KKB stehen darüber hinaus im Rahmen von anlageninternen Notfallmaßnahmen Einrichtungen zur mobilen Bespeisung der Zwischenkühler sowie die entsprechenden Anschlussmöglichkeiten zur Einspeisung in das Brennelement-Lagerbecken zur Verfügung.

Hinsichtlich der grundsätzlichen Verfügbarkeit einer diversitären Wärmesenke ergibt sich somit kein bewertungsrelevanter Unterschied.

Grundsätzlich steht die diversitäre Wärmesenke in der Anlage KKB mit dem Notbrunnen und dem Notstandbrunnen über zwei verfahrenstechnisch unabhängige Systeme zur Verfügung. Ereignisabhängig stehen diese jedoch nur eingeschränkt zur Verfügung. Allerdings verbleibt in diesen Fällen in der Anlage KKB auch noch die Möglichkeit zum Aufbau einer Nebenkühlwasserversorgung im Rahmen von anlageninternen Notfallmaßnahmen. Diesbezüglich geht die Auslegung des KKB über diejenige einzelner noch im Leistungsbetrieb befindlicher deutscher DWR Anlagen hinaus, was wir als sicherheitstechnischen Vorteil einstufen. Insbesondere die Anlagen GKN II und KKP 2 verfügen allerdings beide über (n+1)-redundante und diversitäre Wärmesenken, so dass sich diesbezüglich kein eindeutiger bewertungsrelevanter Unterschied festhalten lässt.



## 8. Extreme Wetterbedingungen

Als eine wesentliche Reaktion auf die Ereignisse in Fukushima hat die Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) die „Safety Reference Levels for Existing Reactors“ überarbeitet (WENRA 2014). Hierbei wurde auch basierend auf den Empfehlungen der ENSREG aus dem EU-Stresstest ein neues Reference Level ergänzt, der Issue T: „Natural Hazards“. Dieser fordert insbesondere, dass als Bemessungsereignisse Einwirkungen mit einer Häufigkeit grösser gleich  $10^{-4}$  pro Jahr auch für extreme Wetterbedingungen zu berücksichtigen sind. Sofern Einwirkungen mit einer solchen Häufigkeit nicht mit einer ausreichenden Aussagesicherheit bestimmt werden können, sind deterministisch Einwirkungen festzulegen, die ein vergleichbares Sicherheitsniveau gewährleisten. Dabei sind auch historische Ereignisse mit einer Sicherheitsmarge abzudecken. Auch Einwirkungen mit geringeren Eintrittshäufigkeiten sind im Rahmen der Analyse auslegungsüberschreitender Ereignisse zu analysieren.

Weitere Erläuterung zum Reference Level T wurden mit (WENRA 2015) veröffentlicht, speziell mit Blick auf extreme Wetterbedingungen zusätzlich mit (WENRA 2016). Demnach ist insbesondere auch das gleichzeitige Auftreten verschiedener, ggf. kausal bedingter Einwirkungen zu berücksichtigen.

Die deutsche Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) hat mit ihrer Empfehlung zur Robustheit der deutschen Anlagen (RSK 2012) die Durchführung einer systematischen Analyse zur Absicherung der vitalen Sicherheitsfunktionen bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen von außen (EVA) empfohlen, um Potentiale zur angemessenen Anhebung der Robustheit zu identifizieren, für die ggf. ergänzende Maßnahmen konzipiert werden sollten. In Konkretisierung dieser Forderung für extreme Wetterbedingungen hat die RSK in ihrer Stellungnahme zur Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung festgestellt (RSK 2013)

*„... ‘dass internationalen Entwicklungen (ENSREG, RHWG/WENRA) folgend Nachweise im Auslegungsbereich für die Beherrschung von Wetterbedingungen mit einer Wiederkehrhäufigkeit von  $10^{-4}/a$  geführt werden sollen. Sofern sich Einwirkungen in diesem Häufigkeitsbereich nicht mit hinreichender Aussagezuverlässigkeit ermitteln lassen, sollte mit ingenieurmäßigen Bewertungen deterministisch eine sichere Ereignisbeherrschung sowie eine hohe Robustheit ausgewiesen werden.’ Ergänzend wurde angeregt, im Sinne der Robustheit über diese Einwirkungen hinausgehende Einwirkungen mit ingenieurmäßigen Abschätzungen zur Ermittlung von Sicherheitsreserven zu berücksichtigen.“*

Im Rahmen ihrer Stellungnahme hat die RSK auch mögliche Einwirkungen und Einwirkungskombinationen qualitativ im Hinblick auf ihre Abdeckung durch die bestehende Auslegung bewertet. Dabei wurden auch verschiedene Einwirkungen und Einwirkungskombinationen identifiziert, für deren Einschätzung ihrer Abdeckung aus Sicht der RSK noch weitere Analysen erforderlich sind. Für diese sollte mit einer ingenieurtechnischen Bewertung im Rahmen der Robustheitsprüfungen von den Betreibern untersucht werden, ob erforderliche vitale Sicherheitsfunktionen unzulässig beeinträchtigt werden können. Eine entsprechende Forderung N-24 ist auch Gegenstand des Nationalen Aktionsplans (BMUB 2016), wonach für alle deutschen Druckwasserreaktoren mit der Genehmigung zu Leistungsbetrieb entsprechende Untersuchungen durchgeführt wurden.

Spezifisch mit Blick auf den Schutz gegen Blitzeinwirkungen hat die RSK festgestellt (RSK 2016):

*„Da sich die Einwirkungen von Blitzen im Häufigkeitsbereich bis  $10^{-4}/a$  nicht mit hinreichender Aussagezuverlässigkeit ermitteln lassen, soll mit ingenieurmäßigen Bewertungen deterministisch eine sichere und robuste Beherrschung von Einwirkungen ausgewiesen werden. Die RSK empfiehlt dazu über die Anforderungen der Regel KTA 2206 hinaus, den Nachweis der Beherrschung von Blitzeinschlägen mit Blitzparametern der festgelegten Obergrenzen (300 kA; 300 kA/ $\mu$ s) zu führen. Letzteres kann anlagenspezifisch auf Basis der Berechnungsvorschriften der KTA 2206 oder alternativ mithilfe variabler Blitzkugelradien erfolgen.“*

## 8.1. Sachstand

Gemäß der Verordnung der UVEK vom 17.06.2009 (UVEK 2009) sind für die schweizerischen Kernkraftwerke die Auswirkungen von extremen Wetterbedingungen hinsichtlich des Verlusts von nicht ausgelegten Hilfs- und Versorgungssystemen sowie von Druck- und Temperaturbelastungen von Gebäuden zu berücksichtigen. Weiterhin ist ein Spannungseintrag in elektrische Einrichtungen durch Blitzeinschlag zu berücksichtigen. Insbesondere für extreme Wetterbedingungen wird dabei auch eine probabilistische Gefährdungsanalyse gefordert, wobei Gefährdungen mit einer Häufigkeit grösser gleich  $10^{-4}$  pro Jahr zu berücksichtigen und zu bewerten sind.

Bei neuen oder geänderten Gefährdungsannahmen muss der Betreiber einer Kerntechnischen Anlage die deterministische Störfallanalyse und die probabilistische Sicherheitsanalyse erneuern und die Auswirkungen auf die Anlage und insbesondere auf das Risiko bewerten.

Die ENSI-Richtlinie (ENSI 2009b) spezifiziert die Anforderungen an eine probabilistische Sicherheitsanalyse. Dabei werden hinsichtlich extremen Winden und Tornados in den Abschnitten 4.6.3 bzw. 4.6.4 explizite Anforderungen zur Berücksichtigung dieser Einwirkungen formuliert.

Darüber hinaus sind weitere Gefährdungen wie Trockenheit, Erosion, Waldbrand, hohe Sommertemperaturen, Vereisung, Hangrutschung/Bergsturz, Blitzschlag, Fluss-Niedrigwasser, tiefe Wintertemperaturen, Flussbettverlagerung, Verstopfung der Einlassrechen und -siebe durch vom Fluss transportiertes Material (wie Baumstämme, Äste, Blätter, Muscheln, Algen etc.), Schnee(verwehungen) sowie Bodenverfestigung (Schrumpfen/Aufquellen) zu analysieren, sofern nicht mit qualitativen Argumenten ein vernachlässigbarer Beitrag zur Gesamtgefährdung der Anlage gezeigt werden kann oder eine quantitative Abschätzung einen Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit unterhalb von  $10^{-9}$  pro Jahr ergibt. Bei der Analyse sind Kombinationen hinsichtlich außerordentlich rauer Winterbedingungen mit Schnee(verwehungen), niedrigen Temperaturen und Vereisung, sowie ausgeprägt harte Sommerbedingungen mit hohen Temperaturen, Trockenheit, Waldbrand und niedrigem Flusswasserspiegel zu betrachten.

Bereits im schweizerischen Länderbericht zum EU-Stresstest (ENSI 2011c) hat ENSI festgestellt, dass nachvollziehbare Gefährdungsanalysen für extreme Wetterbedingungen und zugehörige Nachweise der Beherrschung nicht durchgehend vorhanden sind.

Im schweizerischen Aktionsplan 2012 (ENSI 2012a) wurde daraufhin von den Betreibern gefordert, bis zum 31.12.2012 Nachweise zur Beherrschung extremer Wetterbedingungen auf Basis aktualisierter Gefährdungsannahmen vorzulegen. Voraussetzung dafür war jedoch die Definition noch fehlender Randbedingungen für diese Nachweise, die vom ENSI bis zum 30.06.2012 vorzulegen war. Davon betroffen waren nach ENSI

*„Extreme Winde, Tornados, Starkregen auf dem Anlagenareal, extreme Sommer- und Wintertemperaturen sowie extreme Schneelasten“.*

Weiterhin kann gemäß (ENSI 2012a) eine Überlagerung verschiedener extremer Wetterbedingungen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Auch muss in Einzelfällen ein potentieller Effekt des Klimawandels berücksichtigt werden, so insbesondere hinsichtlich extremer Temperaturen. Hinsichtlich Blitzeinwirkungen wurde die bisherige Auslegung der schweizerischen Kernkraftwerke gemäß der HSK Vorgabe zu „Schweizer Normblitzen“ von ENSI als abdeckend beurteilt.

Mit (ENSI 2012c) wurden die entsprechenden Randbedingungen zu Nachweisführung in Ergänzung zu den Vorgaben in (ENSI 2009b) vorgelegt. Ergänzend zu den oben genannten Einwirkungen werden dabei unter Bezug auf den IAEA Specific Safety Guide SSG-18 (IAEA 2011) auch die Einwirkungen durch Hagel, vereisenden Regen und Schneelasten als zu berücksichtigend genannt und in den Anhängen 1 und 2 Anforderungen an die probabilistische Gefährdungsanalyse sowie an die Nachweise des ausreichenden Schutzes der Anlage gegen diese Gefährdungen erlassen. Gemäß (ENSI 2012c) haben die schweizerischen Betreiber eine umfassende gemeinsame Studie zur Gefährdung durch extreme Wetterbedingungen angekündigt, für diese jedoch einen Zeitraum von 2,5 Jahren veranschlagt. Dieser Zeitraum wurde von ENSI als zu lang eingestuft. ENSI hat auf dieser Basis die Forderung erlassen, dass die Betreiber bis Ende 2012 ein detailliertes Konzept zur Nachweisführung und bis Ende 2013 Nachweise zum ausreichenden Schutz der Anlagen vorlegen. Dabei sind auch vorhandene Margen gegenüber der Auslegung auszuweisen.

Nach (ENSI 2013a) wurde auch vom internationalen Peer-Review Team im Rahmen der Auswertung des EU-Stresstests empfohlen, die in den schweizerischen Anlagen vorhandenen Margen gegenüber extremen Wetterbedingungen beispielsweise im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen neu zu bewerten. Gemäß (ENSI 2013a) wurde von den schweizerischen Betreibern Ende 2012 fristgerecht ein Konzept zum Nachweis des ausreichenden Schutzes gegen extreme Wetterbedingungen eingereicht. Eine Stellungnahme des ENSI zu diesem Konzept wurde für das erste Quartal 2013 angekündigt.

Nach (ENSI 2014a) sieht das Konzept der Betreiber auch eine anlagenspezifische Beurteilung der Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlagen unter Leitung von swissnuclear vor. Allerdings sind im Laufe der Projektbearbeitung Verzögerungen aufgetreten, so dass die Fertigstellung des Projekts sich bis Ende 2014 verzögere. Demnach sah der Aktionsplan nunmehr eine Vorlage erster Nachweise durch die Betreiber in den ersten beiden Quartalen von 2014 vor, eine Prüfung eingereichter Nachweise (außer Luft- und Flusswassertemperaturen) durch ENSI sollte im vierten Quartal 2014 erfolgen, die Vorlage der offenen Nachweise (für Luft- und Flusswassertemperaturen) sollte dann ebenfalls im vierten Quartal 2014 erfolgen.

Gemäß (ENSI 2015f) haben die Betreiber Mitte 2014 die Nachweise zur Abdeckung von extremen Winden, Tornados, Starkregen auf dem Anlagenareal und Schneehöhen vorgelegt. Ende 2014 sind auch die noch offenen Nachweise zu extremen Lufttemperaturen in Verbindung mit extremen Flusswassertemperaturen eingereicht worden.

Nach (ENSI 2015a) können die extremen Wetterbedingungen in instantan auftretende Gefährdungen mit innerhalb kurzer Zeit auftretenden Lasten und in die übrigen Gefährdungen mit Vorlaufzeiten von Stunden bis Tagen aufgeteilt werden. Für die instantanen Gefährdungen wie Wind, Tornado, Starkregen, Hagel und vereisenden Regen müssen die Lasten durch die Auslegung der Anlage beherrscht werden. Bei anderen Gefährdungen kann dagegen die Anlage geordnet abgefahren und es können weitere Maßnahmen zur Beherrschung der Gefährdungen ergriffen werden. Gemäß (ENSI 2015a) wurden die geforderten Gefährdungsanalysen sowie zugehörige Nachweise durch die Betreiber vorgelegt. Die Überprüfung der Gefährdungsanalysen

durch ENSI war aufgrund der Notwendigkeit vertiefender Abklärungen jedoch noch nicht abgeschlossen, so dass in der Folge auch die Überprüfung der zugehörigen Nachweise zum ausreichenden Schutz der Anlagen verzögert war. Demnach wurde als neuer Termin für den Abschluss der Überprüfung der Gefährdungsanalysen das zweite Quartal 2015 genannt, eine Stellungnahme des ENSI zu den Nachweisen zum ausreichenden Schutz wurde für das vierte Quartal 2015 vorgesehen.

Mit (ENSI 2015d) hat das ENSI zu den Gefährdungsanalysen der Betreiber für den Standort Beznau Stellung genommen. Es hält fest, dass die bis dahin vorgelegten Gefährdungsanalysen die gestellten Bedingungen nur bedingt erfüllen. Es fordert eine Überarbeitung von durch das KKB vorgelegten Berichten bis zur nächsten PSÜ. Weiterhin fordert das ENSI ebenfalls bis zur nächsten PSÜ für extreme Winde sowie für extreme Lufttemperaturen, die Gefährdungen auf Basis regionaler Betrachtungen neu zu bestimmen und dabei historische Daten soweit verfügbar und möglich mit zu berücksichtigen.

Nach (ENSI 2015e) fehlen in den Gefährdungsanalysen fast durchgehend Angaben zum Mittelwert der Gefährdungen, zudem sind nach Einschätzung des ENSI einige Werte nicht plausibel. Um dennoch bereits die vorgelegten Nachweise der Betreiber prüfen zu können, hat das ENSI gemäß (ENSI 2015e) verschärfte Gefährdungsannahmen provisorisch festgelegt. Diese sind für das KKB in Tabelle 8-1 zusammengestellt.

Auf Basis der provisorischen Gefährdungsannahmen hat das ENSI gemäß (ENSI 2016h) die Nachweise der Betreiber zum ausreichenden Schutz der Anlagen geprüft. Demnach wurden die extremen Wetterbedingungen nunmehr in drei Kategorien – instantan, mittelfristig und langfristig auftretende – unterteilt, siehe Tabelle 8-1. Die instantan auftretenden Einwirkungen müssen demnach durch die Auslegung der Anlage beherrscht werden, bei mittelfristigen (mehrere Stunden bis Tage Vorlaufzeit) sowie bei langfristigen Gefährdungen (Wochen bis Monate) können Maßnahmen zur Reduktion von Belastungen kreditiert werden. Von den Betreibern wurden dabei bis zum Frühjahr 2016 die entsprechenden Nachweise sowie Nachforderungen des ENSI vorgelegt.

**Tabelle 8-1: Provisorische Gefährdungsannahmen für das KKB**

Gefährdung	KKB	Wirkung	Untersuchung
Wind	Siehe Tornado	Instantan	Quantitativ
Tornado	60 m/s	Instantan	Quantitativ
Max. Lufttemperatur	42°C	Mittelfristig	Quantitativ
Min. Lufttemperatur	-30°C	Mittelfristig	Quantitativ
Max. Flusstemperatur	28,2°C	Langfristig	Quantitativ
Min. Flusstemperatur	Auftreten von Eisbrei	Langfristig	Quantitativ
Starkregen auf Anlageareal	Max. mögliche Wasseransammlung auf den Gebäudedächern („roof ponding“)	Instantan	Quantitativ
Schneelast	2,7 kN/m <sup>2</sup>	Mittelfristig	Quantitativ
Hagel	Hagelkorndurchmesser 15 cm, max. Fallgeschwindigkeit 53 m/s	Instantan	Qualitativ
Vereisung	k.A.	Instantan	Qualitativ
Waldbrand	k.A.	Mittelfristig	Qualitativ
Trockenheit	k.A.	Langfristig	Qualitativ
Extreme Winterbedingungen	k.A.	Langfristig	Qualitativ
Extreme Sommerbedingungen	k.A.	Langfristig	Qualitativ

Quelle: (ENSI 2015e) sowie (ENSI 2016h)

In (ENSI 2016g) stellt ENSI fest, dass der Nachweis erbracht wurde, dass die Kernkühlung im Fall extremer Wetterbedingungen einzelfehlersicher gewährleistet ist. Die Anlagen können in einen sicheren Zustand überführt und dort über 72 Stunden gehalten werden.

Im Ergebnis bestätigt das ENSI auch mit (ENSI 2016h), dass der Schutz schweizerischer Kernkraftwerke gegen extreme Wetterbedingungen ausreichend ist. Insbesondere die Notstandssysteme sind demnach sehr robust gegen Einwirkungen aus extremen Wettern. Zur Erhöhung vorhandener Sicherheitsmargen hat das ENSI dennoch zusätzliche Forderungen gestellt.

Speziell für die Anlage KKB stellt ENSI fest, dass KKB

*„mit den Notstandssystemen beider Blöcke und dem im Rahmen des Projektes AUTANOVE nachgerüsteten Abfahrpfad 1b über mehrere Abfahrpfade zur Beherrschung extremer Wetterbedingungen verfügt und diese Abfahrpfade Sicherheitsmargen besitzen.“*

Darüber hinaus fordert ENSI vom KKB, bis 31.12.2016

- für die Stahlkonstruktion der Frischdampfabblesestation die Widerstandsfähigkeit gegen Windlasten (Wind Fragilities) detailliert zu bestimmen und daraus die vorhandenen Sicherheitsmargen neu zu bestimmen,
- die Betriebsdokumentation so anzupassen,

- dass bei extrem niedrigen Außenlufttemperaturen der Lüftungsabschluss des Notstandgebäudes durch die Operateure ausgelöst wird sowie
- bei extrem hohen Außenlufttemperaturen der Lüftungsabschluss des Notspeisewassergebäudes durch die Operateure überwacht und rechtzeitig ausgelöst wird,
- zu prüfen, ob die Anlage bei extrem hohen Flusswassertemperaturen über das primäre Nebenkühlwassersystem in den kalt-abgestellten Zustand überführt und dort mindestens 72 Stunden gehalten werden kann.

Weiterhin hat KKB bis zum 28.02.2017 zu prüfen, ob die Kühl- bzw. Heizungsanlage durch die AUTANOVE-Notstromdiesel im Notstromfall versorgt werden kann, um längerfristig eine aktive Kühlung beziehungsweise Heizung der Anlagenräume im AUTANOVE-Gebäude zu ermöglichen. Falls dies möglich ist, ist in die Betriebsdokumentation die Zuschaltung der Heizungsbeziehungsweise Kühlanlage durch die Operateure aufzunehmen.

Schließlich wird in (ENSI 2016g) festgestellt, dass im Rahmen der Prüfung insbesondere bezüglich der Gefährdungen Starkregen und extreme Temperaturen weitere Maßnahmen zur genaueren Quantifizierung der vorhandenen Sicherheitsmargen des Abfahrpfades 1 und zur Erhöhung der Sicherheitsmargen identifiziert wurden. Die Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheitsmargen zielen insbesondere darauf ab, den Schutz sicherheitsrelevanter Gebäude der Abfahrpfade 1 gegen Wasser- und Temperatureintrag zu verbessern. Die Umsetzung der Forderungen steht noch aus und wird vom ENSI im Aufsichtsverfahren verfolgt.

Gemäß der Angaben in (ENSI 2016i) wurden die Gebäude des KKB mit Blitzschutzanlagen entsprechen dem Stand der Technik bei der Erstellung ausgerüstet. Für das Notstand-, Notspeisewasser- und BOTA-Gebäude (Gebäuden mit sicherheitstechnischer Bedeutung) wurden vom ENSI 1979 zusätzliche Blitzkennwerte gefordert und die Blitzschutzmaßnahmen gemäß dem Stand der Technik unter Berücksichtigung der vom ENSI geforderten Werte ausgeführt. Durch KKB wurde weiterhin ein Blitzschutzkonzept erarbeitet, dass unter anderem die Grundlage für alle baulichen Maßnahmen seit 2008 darstellt. Im Rahmen des Projekts ZEUS (Beschaltung der Signalleitungen mit Überspannungsableitern) wurden zudem die Einrichtungen im Notstand- und Sicherheitsgebäude gegen die Auswirkung von Blitzeinschlägen geschützt. Nach (ENSI 2016i) erfüllen die im KKB vorhandenen Maßnahmen des Blitzschutzes die nationalen und internationalen Vorschriften. Die gemäß (ENSI 2016b) anzusetzenden Blitzstromparameter sind in Tabelle 8-2 wiedergegeben.

**Tabelle 8-2: Für die Blitzschutztechnisch speziell zu schützenden Einrichtungen anzusetzende Blitzstromparameter**

Blitzstromparameter	Auslegungsblitz 1	Auslegungsblitz 2	Auslegungsblitz 3
Stromscheitelwert $I_{max}$	50 kA	100 kA	300 kA
Stromsteilheit Stirn	200 kA/ $\mu$ s	100 kA/ $\mu$ s	7,5 kA/ $\mu$ s
Halbwertszeit der Rückflanke	50 $\mu$ s	1 000 $\mu$ s	200 $\mu$ s

Quelle: (ENSI 2016b)

## 8.2. Stellungnahme

Die gemäß schweizerischem Regelwerk sowie aus Auflagen des ENSI resultierenden Anforderungen an die Gefährdungsanalysen der Anlage KKB zu extremen Wetterbedingungen entsprechen dem grundsätzlichen Anforderungsniveau und dem Ereignisspektrum, wie es durch internationale Anforderungen (IAEA, WENRA) oder auch in Empfehlungen der RSK in Deutschland gefordert wurde. Sowohl die zu berücksichtigende Häufigkeit von Einwirkungen als auch eine Analyse von möglichen Kombinationen kausal bedingter oder unabhängiger Ereignisse entsprechen dabei grundsätzlich dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Welche Einwirkungen dabei für die Schweizerischen Anlagen in welcher Form und in welchen Kombinationen bei den Nachweisen zu extremen Wetterbedingungen tatsächlich berücksichtigt werden, kann allerdings auf Basis der vorliegenden Unterlagen nicht im Detail bewertet werden.

Für die schweizerischen Anlagen wurde vom ENSI festgestellt, dass vielfach die zu unterstellenden Einwirkungen nicht quantitativ bestimmt wurden, sondern ein qualitativer Nachweis einer ausreichenden Robustheit der Anlage vom Betreiber zu führen ist. Weiterhin kann gemäß ENSI für die verschiedenen Einwirkungen in Abhängigkeit von der verfügbaren Reaktionszeit (instantan, mittelfristig und langfristig auftretende Ereignisse) ein angepasstes Beherrschungskonzept herangezogen werden. Auch dies entspricht grundsätzlich internationalen Empfehlungen und der für deutsche Anlagen geforderten Vorgehensweise.

Für die Anlage KKB wurde von ENSI bestätigt, dass die zu unterstellenden extremen Wetterbedingungen einzelfehlersicher beherrscht werden können, wobei vor allem die Notstandssysteme darüber hinaus eine hohe Robustheit ausweisen. Dies ist mit dem Sicherheitsstatus der deutschen Anlagen grundsätzlich vergleichbar. Für die deutschen Anlagen ergibt sich dabei insbesondere aufgrund des abdeckenden Charakters von anderen Anforderungen zum Schutz vor Einwirkungen von außen (Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle) eine hohe Robustheit der für vitale Sicherheitsfunktionen erforderlichen Einrichtungen.

Allerdings hat das ENSI auch verschiedene Forderungen zur Erhöhung der Sicherheitsmargen aufgestellt. Einzelne vergleichbare Forderungen wurden auch für deutsche Anlagen aufgestellt, so z. B. mit Blick auf ein Eindringen von Wasser in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude in der Weiterleitungsnachricht 02/2012. Eine Bewertung von Forderungen an die Anlage KKB im Vergleich zu den für deutsche Anlagen abgeleiteten Forderungen würde jedoch eine anlagenspezifische Prüfung erforderlich machen, die im Rahmen der hier vorgenommenen Untersuchungen nicht möglich ist.

Spezifisch mit Blick auf die Einwirkungen durch Wind bzw. Tornado sind gemäß Tabelle 8-1 für die Anlage KKB Windgeschwindigkeiten von 60 m/s zu unterstellen. Dies entspricht einem Tornado der Stufe F2 auf der Fujita-Skala. Gemäß der Vorgaben in (ENSI 2009b) sind für eine probabilistische Bewertung der Gefährdung durch Tornados in der Schweiz jedoch auch Tornados der Stärke F3 und größer (Windgeschwindigkeiten von mehr als 70 m/s) zu berücksichtigen. Inwieweit die Festlegung einer maximalen zu berücksichtigenden Windgeschwindigkeit von 60 m/s für die Anlage KKB sowohl das erforderliche Bemessungsereignis, als auch eine im Sinne der Robustheit über diese Einwirkung hinausgehende Einwirkung zur Ermittlung von Sicherheitsreserven abdeckt ist offen.

Bezüglich des Schutzes gegenüber Blitzeinwirkungen hat die deutsche RSK neue Anforderungen aufgestellt, die sowohl eine Einhaltung des im Rahmen der Auslegung erforderlichen Schutzes der Anlagen als auch eine darüber hinausgehende Robustheit für auslegungsüberschreitende Blitzeinwirkungen sicherstellen soll. Diese Empfehlung stellt hinsichtlich der zu berücksichtigenden

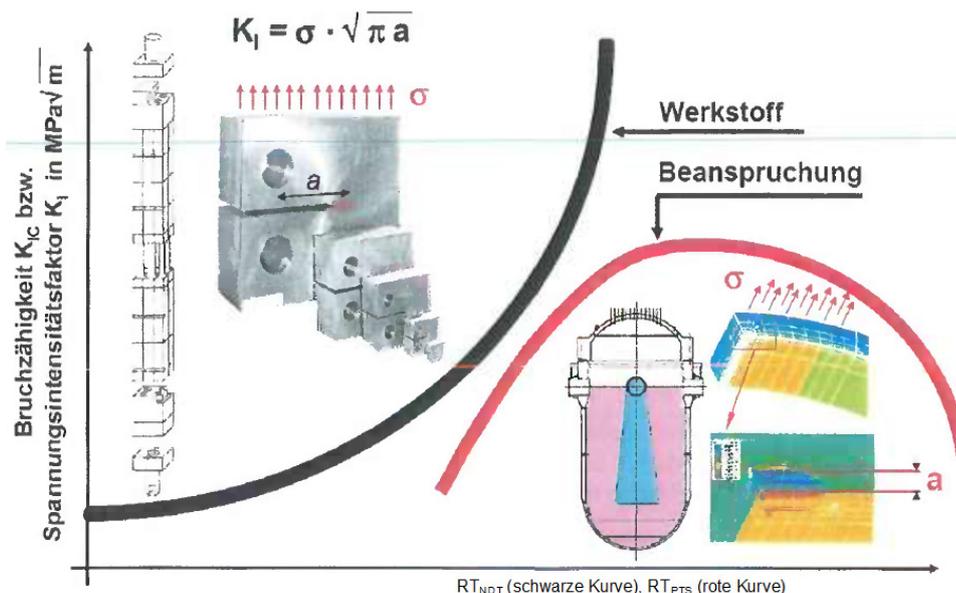
Blitzstromsteilheit höhere Anforderungen, als diese bislang gemäß schweizerischem Regelwerk gefordert werden.

## 9. Reaktordruckbehälter

Der Reaktordruckbehälter (RDB) ist die sicherheitstechnisch wichtigste Komponente im Kernkraftwerk, die nicht austauschbar ist. Im Leistungsbetrieb ist sein Werkstoff einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt, die seine fortschreitende Alterung, Versprödung und Ermüdung verursachen. Die Neutronenstrahlung verursacht den wesentlichen Beitrag zur Versprödung des Behälters, die ausgesendeten Neutronen verursachen Störungen im Kristallgitter, die sich fortpflanzen und Defekte in der Metallstruktur bilden. Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Rissen wird reduziert und die Neigung zur Rissbildung steigt. Insbesondere die kernbrennstoffnahen Ringe des Reaktordruckbehälters sind von einer Verschlechterung der Materialeigenschaften bzw. geringerer Widerstandsfähigkeit gegenüber Sprödbrechung betroffen. Die im Leistungsbetrieb herrschenden hohen Temperaturen und Drücke sowie Lastwechsel beim An- und Abfahren oder bei kurzfristig ablaufenden Reaktorschnellabschaltungen verursachen zusätzlich Materialermüdung.

Ein Integritätsversagen des Reaktordruckbehälters muss ausgeschlossen werden können, da es keine Sicherheitseinrichtung gibt, die ein solches Versagen noch beherrschen würde. Deshalb sind höchste Anforderungen an die Qualität dieser Komponente zu stellen, beginnend bei der Herstellung. Im Leistungsbetrieb muss eine Absicherung der Qualität durch Maßnahmen gegen Schadensmechanismen (Überwachung der Wasserchemie und der Betriebsparameter) sowie ein Alterungsmanagement (wiederkehrende Prüfungen, Instandhaltung) gewährleistet werden. Dazu sind verschiedene Nachweise zur Integritätssicherheit zu führen und den aktuellen Veränderungen anzupassen, insbesondere auch ein sogenannter Sprödbrechtsicherheitsnachweis, siehe Abbildung 9-1. Während die schwarze Kurve die temperaturabhängige Kenngröße für die Belastungsfähigkeit (Bruchzähigkeit) des RDB-Werkstoffs wiedergibt, zeigt die rote Kurve die potenzielle Beanspruchung beim sogenannten Thermoschockstörfall (Spannungsintensitätsfaktor) auf. Der Abstand, den beide Kurven voneinander haben, zeigt die Sicherheitsmarge des RDB-Zustands gegenüber Sprödbrechung auf, sie dürfen sich nicht tangieren.

Abbildung 9-1: Prinzipdarstellung Sprödbrechtsicherheitsnachweis



Quelle: (axpo 2011d)

Lässt sich der Nachweis der Integritätssicherheit unter Störfallbedingungen nicht mehr führen, erfordert dies eine Außerbetriebnahme des Reaktors (UVEK 2008).

## 9.1. Sachstand

### 9.1.1. Versprödungszustand der Reaktordruckbehälter der Anlage KKB vor der Entdeckung von Befunden

Die im Betrieb zunehmende strahlungsbedingte Versprödung der oberen und unteren kernnahen RDB-Ringe ist einerseits abhängig von der Kernbrennstoffbelegung im RDB und andererseits von der Materialzusammensetzung des Werkstoffs, denn nicht jeder Werkstoff reagiert gleich auf Bestrahlung. Die Stärke der Neutronenstrahlung wird über die Fluenz  $\Phi$  beschrieben.

Die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{Ref}$  ist eine - Materialtest spezifische - Kenngröße für den aktuellen Versprödungsgrad des RDBs. Sie darf die im amerikanischen ASME-Code oder im Schweizer Regelwerk in Abhängigkeit von der Legierung des Stahls festgelegte Grenze nicht überschreiten, die den Übergang vom zähen in den spröden Materialzustand des RDB-Materials und damit seine Anfälligkeit gegenüber Sprödbruch beschreibt. Bei zu hohen  $RT_{Ref}$ -Werten des RDB kann unter Thermoschockbedingungen – also bei plötzlicher Abkühlung des Reaktors wie z. B. bei einem Kühlmittelverluststörfall – ein Versagen nicht ausgeschlossen werden.

Der NRC Regulatory Guide 1.99 vom May 1988, der die Strahlungsversprödung von RDB-Material behandelt, fordert für Neuanlagen, die Legierungselemente Kupfer, Phosphor, Schwefel und Vanadium für kernnahe Komponenten möglichst niedrig zu halten. Der Kupfergehalt soll dabei so gewählt werden, dass die kalkulierte Sprödbruchreferenztemperatur zum Ende der Laufzeit des Reaktors in  $\frac{1}{4}$  Tiefe der Wandstärke  $\leq 200^\circ\text{F}$  ( $\sim 93^\circ\text{C}$ ) bleibt. Weiterhin solle die gewählte Höhe des Nickelgehalts dessen schädliche Auswirkungen auf die Strahlungsversprödung berücksichtigen. Ein hoher Nickelgehalt steigert die Strahlungsempfindlichkeit des Stahls (ORNL 2015).

Die Schweizer Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008) fordert, dass die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{Ref}$  einen Wert von  $93^\circ\text{C}$  in  $\frac{1}{4}$  Wandtiefe nicht überschreitet.

Zur Ermittlung der zunehmenden Versprödung wird die aktuelle Sprödbruchreferenztemperatur des RDB mithilfe sogenannter Voreilproben ermittelt. Diese ursprünglich aus den Enden der Originalschmiedestücke der RDB-Einzelteile hergestellten Materialproben werden bei allen Reaktoren mit Beginn des Leistungsbetriebs zwischen RDB-Innenwand und Kernbrennstoff aufgehängt. Aufgrund der größeren Kernnähe eilt die Bestrahlungsreaktion an diesen Voreilproben der tatsächlichen Versprödung des RDB voraus. Nach der Entnahme können diese Materialproben zerstörend geprüft werden. Zusätzlich wird die aktuelle Versprödung des RDB auf Basis der realen Kernzusammensetzung rechnerisch ermittelt. So kann geprüft werden, ob die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{Ref}$  beispielsweise das UVEK-Kriterium nach Schweizer Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008) von  $93^\circ\text{C}$  in  $\frac{1}{4}$  Wandtiefe erfüllt.

Die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{Ref}$  wird typischerweise mittels klassischem Kerbschlagbiegeverfahren nach Charpy (Methode I nach (ENSI 2011b)) ermittelt. Daneben wird auch das neuere, sogenannte Master-Curve-Verfahren nach Wallinn verwendet. Da das UVEK dies 2008 in seiner Außerbetriebnahmeverordnung (UVEK 2008) noch nicht berücksichtigt hatte, führte das ENSI die beiden Master-Curve-Verfahren im August 2011 mit seiner Richtlinie zur Alterungsüberwachung B01/d (ENSI 2011b) ein (Methoden II, A und B).

Bei der Master-Curve Methode IIA wird die Referenztemperatur mittels Zugversuch direkt im bestrahlten Voreilprobenmaterial ermittelt ( $RT_{Ref} = RT_{T0direkt/bestrahlt}$ ), bei Methode IIB wird die

Referenztemperatur im unbestrahlten Ausgangsmaterial erhoben und anschließend mit dem gleichen Zuschlag  $\Delta RT_{\text{Ref}} = \Delta T_{\text{J}}$  für die Versprödung wie bei der klassischen Methode ergänzt ( $RT_{\text{Ref}} = RT_{T_0 \text{ unbestrahlt}} + \Delta T_{\text{J}}$ ). Aufgrund der weniger konservativen Vorgehensweise führt die Master-Curve Methode II zu niedrigeren Sprödbruchreferenztemperaturen, wobei die direkt im versprödeten Material gemessene  $RT_{\text{Ref}} = RT_{T_0 \text{ direkt/bestrahlt}}$  nach Methode IIA zu den niedrigsten und damit am wenigsten konservativen Ergebnissen führt.

Gemäß Axpo (axpo 2011a) wurden die Reaktordruckbehälter von Beznau 1 und 2 Anfang der 60er Jahre von der Societe des Forges et Ateliers du Creusot (SFAC) in Frankreich gefertigt. Die Schmiedestücke der Ringe sind aus dem MnMoNi-Stahl 1.2 MD 07 gefertigt und entsprechen weitgehend, aber nicht vollständig dem Stahl SA-508, grade 3, Class 1 nach ASME-Code (früher: SA-508 Class 3). RDB-Werkstoffe mit hohen Legierungsbestandteilen an Kupfer ( $\text{Cu} > 0,04\%$ ), Nickel ( $\text{Ni} > 1\%$ ) und Phosphor ( $\text{P} > 0,15\%$ ) sowie deren Kombination neigen zu schädlichen Effekte bei der strahleninduzierten Materialversprödung, was zur Herstellungszeit der Schweizer Reaktoren noch unbekannt war. Abbildung 9-2 zeigt die Materialzusammensetzung für die kernnahen Ringe C und D des RDBs von Block 2, die bereits hohe Anteile an diesen Elementen aufweist.

**Abbildung 9-2: Chemische Zusammensetzung der Schmiederinge C und D von Block 2**

	Chem. Zusammensetzung in %										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	V	Mo	Co	Cu
GW Ring C	0,18	1,20	0,017	0,014	0,28	0,73	0,25	$\leq 0,001$	0,47	0,018	0,056
GW Ring D	0,175	1,10	0,013	0,012	0,30	0,69	0,20	$\leq 0,001$	0,48	0,018	0,07

Quelle: (axpo 2015c)

Die Zusammensetzung der Ringe von Block 1 ist nicht veröffentlicht, insbesondere der Ring C von Beznau 1 weist jedoch nach (axpo 2011d) noch höhere Bestandteile an Kupfer, Nickel und Phosphor auf.

#### 9.1.1.1. Versprödungszustand des RDB KKB 1

2010 wurde in Beznau 1 der letzte Voreilprobensatz T (von insgesamt 6 Probensätzen) und in Beznau 2 der vorletzte Probensatz P entnommen. Die Entnahmezeitpunkte der Probensätze wurden auf Basis der Fluenzberechnung so gewählt, dass die erreichte Bestrahlungsreaktion der Bestrahlungsproben die an der RDB-Innenseite für 60 Betriebsjahre (BJ) abdecken. Sie wurden für die Probensätze T, Block 1 mit 64,4 BJ (58 Vollastjahre, VLJ) und P, Block 2 mit 72 BJ (65 VLJ) angegeben (axpo 2011c).

Bei der Auswertung der Proben für Beznau 1 wurde bereits deutlich, dass die Sprödbruchreferenztemperatur in die Nähe des UVEK-Grenzwertes tendierte. Nachdem die Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{\text{Ref}}$  für Beznau 1 für die insgesamt 6 Probensätze mittels Methode I nach (ENSI 2011b) ermittelt wurde, wählte man deshalb zusätzlich noch das neue Master-Curve-Verfahren.

Die zerstörende Prüfung der bestrahlten Voreilproben des KKB 1 zur Ermittlung der bruchmechanischen Zähigkeitswerte wurde an Wedge Open Loaded (WOL)-Proben sowie daraus

rekonstruierten Verbundproben aus dem Probensatz T durchgeführt. Insgesamt stand nur eine geringe Anzahl an Proben zur Verfügung.

Abbildung 9-3 verdeutlicht, dass der Unterschied der Ergebnisse der Sprödbruchreferenztemperatur zwischen Methode I und II B bei ca. 15°C liegt und Methode II A um 34°C unter den Ergebnissen der bisherigen Methode I liegt.

**Abbildung 9-3: Auswertung des letzten Probensatzes T (KKB 1) entsprechend einer Betriebszeit von über 60 VLJ mit allen 3 Methoden**

Beznau Block 1 Probensatz T , Fluenz: 6.04E19 [cm <sup>-2</sup> ]				
Werkstoff	RT <sub>NDT</sub> bzw. RT <sub>ref</sub> (0) [°C]	ΔT <sub>41</sub> [K]	RT <sub>ref</sub> [°C]	Bestimmung der Referenztemperatur nach ENSI-B01 [2]
Schmiedering C	-1	105	104	Methode I
	-16	105	89	Methode II, Variante B
	-	-	70	Methode II, Variante A

Quelle: (axpo 2011d)

Nach erfolgter Auswertung des Voreilprobensatzes müssen die Ergebnisse auf den Zustand des RDB in ¼ Wandstärke und an der RDB-Innenseite übertragen werden, sowohl hinsichtlich der Fluenz als auch der Sprödbruchreferenztemperatur.

Die Sprödbruchreferenztemperatur RT<sub>Ref</sub> des RDB in Abhängigkeit von der Fluenz ist in Abbildung 9-5 für die konventionelle Methode I und in Abbildung 9-4 für die Master-Curve Methode II B wiedergegeben. Die dreieckigen Messpunkte zeigen die Werte der Voreilproben, jeweils mit entsprechender Methode ausgewertet. Beide blauen Kurven für Ring C liegen im Ergebnis 15°C auseinander, entsprechend auch den Angaben in Abbildung 9-3. Der in Abbildung 9-5 fehlende letzte Voreilprobenmesspunkt wurde entsprechend Abbildung 9-3 vom Öko-Institut mit 104°C ergänzt.

Abbildung 9-4:  $RT_{Ref}$  bestimmt nach Master-Curve Methode II B

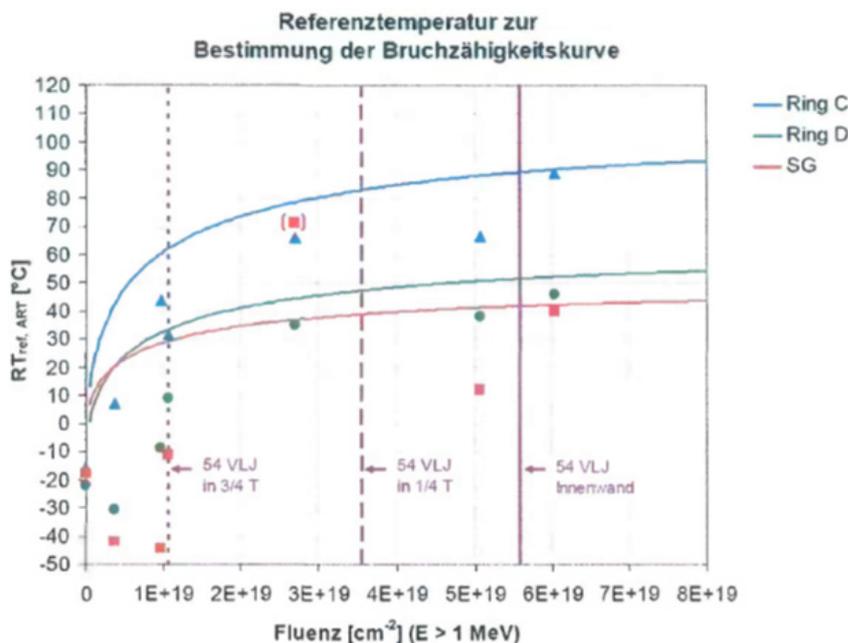


Fig. 4 Block 1,  $RT_{ref,ART}$  in Funktion der Fluenz

Quelle: (axpo 2011d)

Abbildung 9-5:  $RT_{Ref}$  bestimmt nach konventioneller Methode I, ergänzt um den letzten Probenwert, Fluenzen bezogen auf die RDB-Innenwand

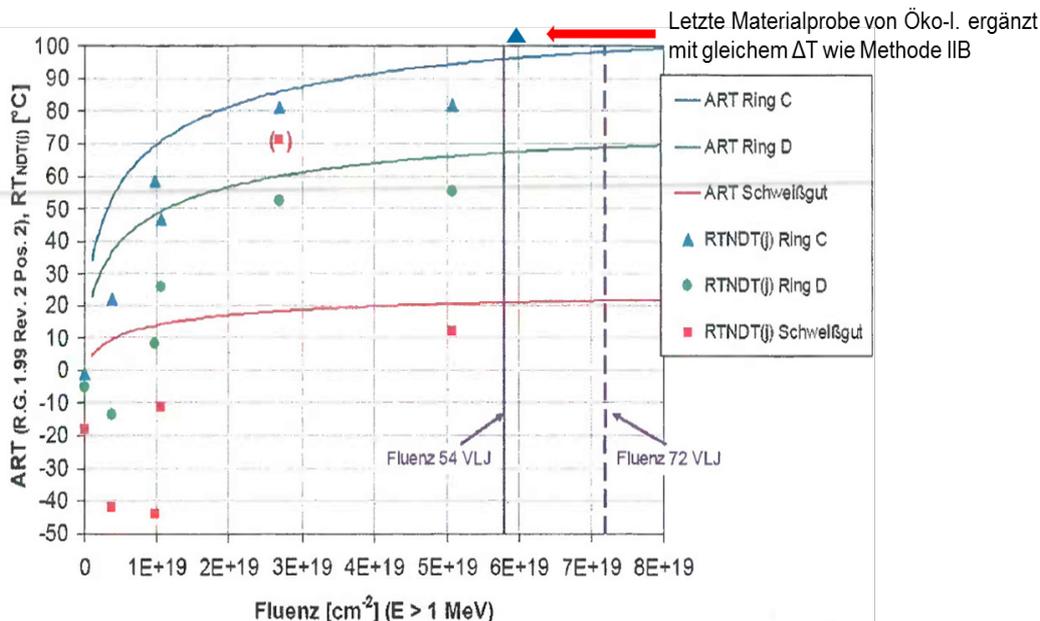


Fig. 2 KKB Block 1  $RT_{NDT}$  und  $RT_{NDT}^{-1}$ -Werte nach Reg. Guide 1.99 Rev. 2 [4] aus [2]

Quelle: (axpo 2011c)

Axpo veröffentlicht seit (axpo 2011d) nur noch Referenztemperaturen der Methode II, obwohl diese eigentlich ursprünglich nur dazu gedacht waren, die bestehende Sicherheitsmarge gegenüber der klassischen Methode I aufzuzeigen.

Axpo begründet die stärkere Versprödung der kernnahen RDB-Ringe von Beznau 1 gegenüber denen von Beznau 2 in (axpo 2011d) mit

- der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung bezüglich der Elemente Kupfer, Nickel und Phosphor,
- der unterschiedlichen Wärmebehandlung der Schmiedeteile beider Blöcke sowie
- weiterer herstellungsbedingter Unterschiede.

ENSI weist darauf hin, dass ein Vergleich der Ergebnisse der RDB-Referenztemperaturen  $RT_{Ref}$  ähnlich alter europäischer Kernkraftwerke, z. B. in Belgien, Frankreich, Schweden und Spanien, zeige, dass beim Schmiedering C von Block 1 bereits 2011 relativ hohe Referenztemperaturen vorlagen (ENSI 2012d).

ENSI hält in (ENSI 2016i) fest, dass die Unterschiede im Versprödungsverhalten der Werkstoffe der RDB von Block 1 und 2 primär auf eine ungünstigere Materialzusammensetzung des RDB von Block 1 zurückgeführt werden können. Weiterhin sei die Neutronenfluenz am RDB von Block 1 ca. 10% höher als bei KKB 2. Grund hierfür sei der spätere Übergang zur „low leakage“-Beladung in KKB 1.

2012 akzeptiert das ENSI die - nach der Auswertung des letzten Materialprobensatzes des RDB-Rings C nach der Methode II B - ermittelte Sprödbruchreferenztemperatur  $RT_{Ref}$  von  $83^{\circ}\text{C}$  in  $\frac{1}{4}$  der Wanddicke, weist aber darauf hin, dass KKB nicht auf die sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse nach der klassischen Methode I nach ENSI B01 eingeht und fordert Auskunft über Konservativitäten, die dazu berechtigen, auf die klassische Methode zu verzichten (ENSI 2012d).

Weiterhin weist das ENSI darauf hin, dass das KKB bisher den ansteigenden Trend der Versprödung bei sehr hohen Fluenzen nicht kommentiert hat und fordert die Begründung der abdeckenden Konservativität des Versprödungsmodells (ENSI 2012d).

Diese bis Ende Mai 2012 einzureichenden Forderungserfüllungen der Axpo oder ENSI-Stellungnahmen hierzu wurden bisher nicht veröffentlicht und können daher im Folgenden nicht weiter bewertet werden.

#### **9.1.1.2. Probleme beim Thermoschocknachweis des RDB KKB 1**

Es muss seitens Axpo der Nachweis geführt werden, dass die verbliebene Bruchzähigkeit des RDB ausreicht, um den Belastungen aus Störfällen standzuhalten. Diese im Störfall auftretenden Belastungen werden in der sogenannten Thermoschock- oder auch PTS-Analyse ermittelt, bei der alle relevanten Kühlmittelverluststörfälle und andere in die Betrachtung einzubeziehenden Transienten analysiert werden müssen. Zum Nachweis der Sprödbruchsicherheit der RDB-Ringe unter Thermoschockbedingungen legte der Betreiber Axpo gemäß (ENSI 2010c) einen Bericht zur sicherheitstechnischen Bewertung bei Kühlmittelverluststörfällen vor. Dieser Bericht zeigte, dass am führenden kernnahen Ring C im Kernnahtbereich eine Referenztemperatur von  $RT_{PTS} = 93^{\circ}\text{C}$  nach 60 Betriebsjahren (BJ) beim Lastfall PTS einzuhalten ist. Der Grenzwert aus der PTS-Analyse des KKB 1 ist somit wesentlich restriktiver als der UVEK-Grenzwert, da er an der RDB-Innenseite einzuhalten ist.

Bereits 2010, vor Auswertung des letzten Voreilprobensatzes T, konnte dieser Nachweis nach dem Master-Curve-Verfahren nicht für alle Bereiche des Rings C geführt werden. (ENSI 2010c) forderte in diesem Zusammenhang den Nachweis, dass die Kühlmittelstrahlen beim untersuchten Leckstörfall die am höchsten versprödete Stelle des Ring C nicht erreichen können. Diese Stelle des Rings C des RDBs liegt bei Azimut  $0^{\circ}$  und damit um  $30^{\circ}$  versetzt unter dem Kühlmittelstutzen.

Auf Basis von Untersuchungen des Paul Scherrer Institut war dies jedoch nicht auszuschließen. ENSI nahm den Nachweis dennoch ab, forderte daraufhin aber (ENSI 2010c), Forderung 4.2-1:

*„Aus den Thermoschock-Analysen wurde als maximal zulässige Referenztemperatur  $RT_{PTS} = 93^{\circ}\text{C}$  zur Einhaltung der Bedingungen zum Ausschluss von Sprödbruch für die höchst belasteten Stellen des Reaktordruckbehälters (RDB) des Blocks 1 bestimmt. Für einen Azimutwinkel von  $0^{\circ}$  werden für den Grundwerkstoff Ring C jedoch Referenztemperaturen von bis zu  $96^{\circ}\text{C}$  an der Oberfläche des RDB nach 60 Betriebsjahren extrapoliert. Es ist daher bis 31. Dezember 2011 von KKB für den RDB des Blocks 1 der Nachweis zu führen, dass die betrachteten Thermoschock-Bedingungen nicht bei einem Azimutwinkel von  $0^{\circ}$  auftreten können.“*

Gemäß (ENSI 2012d) hielt Axpo diesen Nachweis nach dem Stand von W&T zunächst nicht für möglich, deutete aber an, dass für den besonders relevanten Bereich der Azimutposition  $0^{\circ}$  des Rings C verschiedene Konservativitäten bestehen, von denen bisher kein Kredit genommen wurde.

Bei dem von Axpo vorgelegten und aktualisierten Sprödbruchsicherheitsnachweis wurden daraufhin einige Randbedingungen geändert bzw. ergänzt (axpo 2011d):

- Die Neutronenfluenzen wurden aktualisiert: Durch Auswertung der Voreilproben wird einerseits eine experimentelle Neutronenfluenz ermittelt, andererseits wird auf Basis von Neutronentransportprogrammen die theoretische Fluenzverteilung über die Betriebszyklen im RDB in axialer und azimuthaler Richtung, im Speziellen in der RDB-Wand und in den Bestrahlungsproben berechnet. Anhand einer gemittelten Neutronenflussdichte für die letzten Betriebszyklen wird die maximale Fluenz für zukünftige Betriebszyklen beider Blöcke bis 60 Betriebsjahre extrapoliert. Ungefähr im Juli jeden Jahres wird die Neutronenfluenz anhand der Kernbeladung des vorhergehenden Zyklus aktualisiert bzw. angepasst. Während in (ENSI 2010c), Tabelle 4.1-4 für 60 Betriebsjahre oder 54 Volllastjahre an der RDB-Innenseite  $6,0\text{E}+19/\text{cm}^2$  vom Betreiber angegeben werden, sind es in (axpo 2011d) vom Dezember 2011, Tabelle 3 nur noch ca.  $5,56\text{E}+19/\text{cm}^2$ .
- Die Bestrahlungsproben der letzten Probenkapsel T wurden in die Auswertung mit einbezogen.
- Die Auswertung nach dem Master-Curve-Konzept wurde ergänzt: Hierzu wurden sowohl die unbestrahlten Originalproben des Rings C sowie die bestrahlten Materialproben nach dem Master-Curve-Verfahren neu ausgewertet.
- Constraint-Effekte wurden neu berücksichtigt: Dabei soll eine zusätzliche Sicherheitsmarge bei der Bestimmung der Werkstoffwerte durch Standard-Bruchmechanikproben auch für die mehrachsige Belastung im RDB bei der maximal anzunehmenden Fehlergrösse mit der Bestimmung der Constrainteffekte durch numerische Methoden quantifiziert werden. Die Bestimmung der Unterschiede in den „Constraints“ (Dreiachsigkeit des Spannungszustandes), die in einer Verschiebung der Referenztemperatur resultieren, erfolgte einerseits nach der empirischen „T-Stress Methode“ und andererseits nach einem mikromechanischen Sprödbruchversagensmodell („Local Approach“), angepasst auf den Werkstoff von Block 1, Ring C (axpo 2011d). Die Verschiebung der Referenztemperatur der Voreilprobe auf den RDB-Zustand mit zusätzlichem Risspostulat ergebe sich entsprechend der Tabelle in Abbildung 9-6.
- Probabilistische Betrachtungen wurden vorgenommen, um die geringe Wahrscheinlichkeit eines PTS-Störfalls aufzuzeigen.

**Abbildung 9-6: Constraint-Korrektur und Constraint-korrigierte Referenztemperaturen**

Risspostulat	$\Delta T_0$ [°C]		$RT_{ref}^*$ [°C]	
	T-Stress	LA-Modell	T-Stress	LA-Modell
Unterplattierungsris	-42	-25	28	45
Oberflächenriss	-15	-4	55	66

Quelle: (axpo 2011d)

Unter Berücksichtigung dieser geänderten Randbedingungen kann Axpo schließlich auch für die am stärksten versprödete Stelle an der Oberfläche des Rings C am Azimut 0°C bei der Belastung entsprechend eine Referenztemperatur  $RT_{Ref} = 89^\circ\text{C}$  nach Methode II B und  $RT_{Ref} = 80^\circ\text{C}$  nach Methode II A ermitteln. Beide Werte bleiben damit unterhalb von  $RT_{PTS} = 93^\circ\text{C}$ , siehe Abbildung 9-7.

**Abbildung 9-7: Bewertung des Kernnahtbereichs**

Untersuchter Bereich	$RT_{NDT}$ zulässig + [°C]	$RT_{ref. ART}^*$ [°C]	Initiierungs-ausschluss Spröbruch	Initiierungs-ausschluss Zähbruch
Kernnaht naher Bereich, Leckgröße 70cm <sup>2</sup> heißseitiges Leck minimale kaltseitige Einspeisung, JSI1-C + JSI1-D + 1DSP, 12 mm Oberflächenfehler a/2c = 1/6	93	68 ++ (30°Azimut)  80 +++ (0° Azimut)	ja	ja

- + bestimmt aus dem max. Punkt des Lastpfades (Berücksichtigung von WPS)
- \* gültig für die Auslegungsfluenz entsprechend 60 Betriebsjahre an Innenwand
- ++ Stelle der höchsten Belastung (Strähnenmitte) und Fluenz an dieser Stelle
- +++ Stelle der höchsten Fluenz überlagert mit Stelle der höchsten Belastung

Quelle: (axpo 2011d)

Das ENSI erwartete nach dieser Anpassung des Thermoschocknachweises folgende weitere Abklärung:

*„Das KKB geht nicht detailliert auf die sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse nach der klassischen Prüfmethode (Methode I nach ENSI-B01) ein. Bei Auswertung nach Methode I ist zu begründen, welche Konservativitäten für die speziellen Verhältnisse für Schmiedering C von Block 1 dazu berechtigen, auf eine Bewertung verzichten zu können. Die Konservativitäten sind aufzuzeigen und zu begründen.“*

Die Antwort seitens Axpo auf diese Forderung liegt uns nicht vor.

Gemäß (ENSI 2016i) reichte das KKB fristgerecht den Bericht zur Forderung 4.2-1 ein. Nach eingehender Prüfung kam das ENSI demnach 2012 zum Schluss, dass die Spröbruchsicherheit des RDB Block 1 für eine Betriebsdauer von 60 Jahren nachgewiesen und damit die Forderung 4.2-1 erfüllt sei. Diese Bewertung basiert allerdings auf dem Kenntnisstand von 2012. Neue Erkenntnisse haben sich in der Revisionsabstellung 2015 ergeben, in der Befunde im

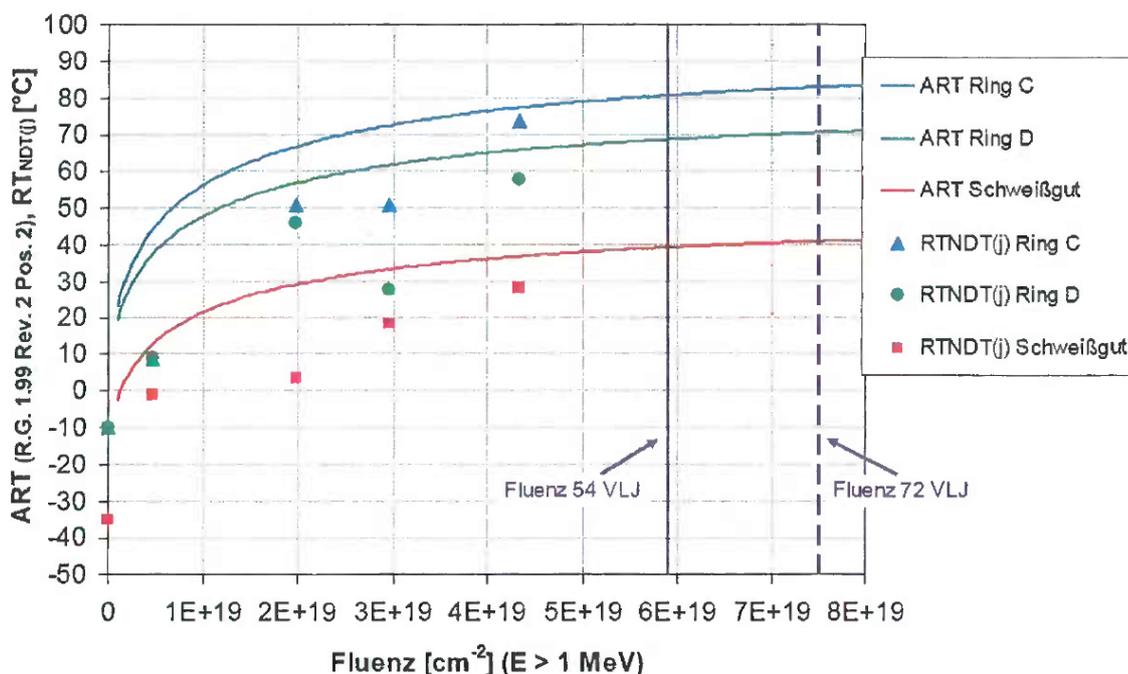
Grundwerkstoff des RDB festgestellt worden sind, deren Bedeutung für den Sprödbruchsicherheitsnachweis noch zu analysieren ist.

### 9.1.1.3. Versprödung des RDB KKB 2

Der RDB von KKB 2 weist niedrigere Referenztemperaturen auf als derjenige des KKB 1. Nach den Erkenntnissen von (axpo 2011c) wurde eine einschränkende Auswirkung der Neutronenversprödung der RDB-Werkstoffe auf den Langzeitbetrieb ausgeschlossen.

Die Auswertung der Sprödbruchreferenztemperatur für die ersten vier Probensätze nach der klassischen Methode I zeigt Abbildung 9-8. Der Maximalwert für die Sprödbruchreferenztemperatur bei 54 VLJ bleibt bei ca. 80°C.

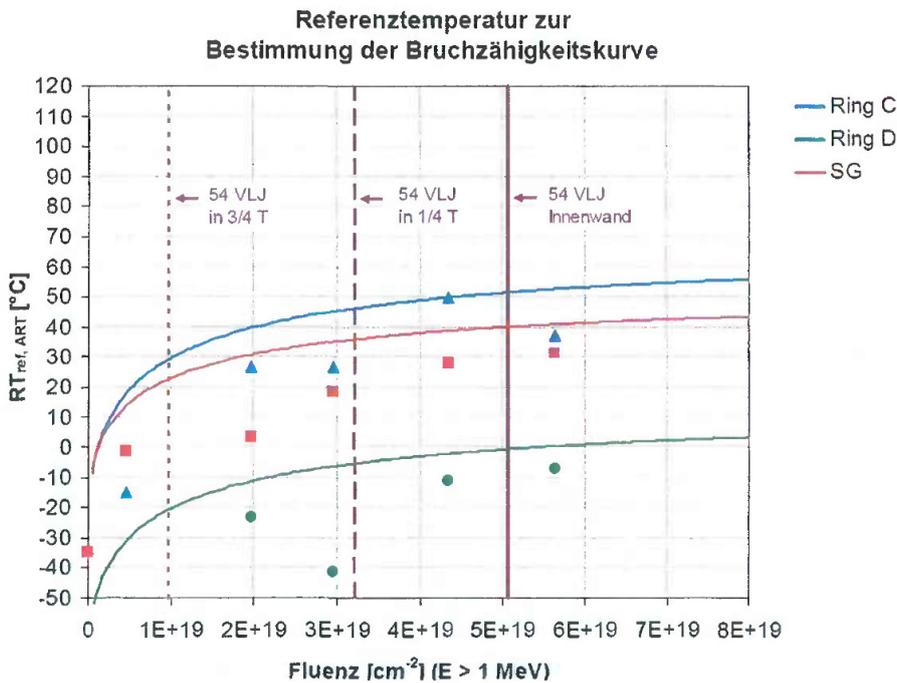
Abbildung 9-8: KKB, Block 2,  $RT_{Ref}$  nach klassischer Methode I und Probenwerte  $RT_{NDT(j)}$



Quelle: (axpo 2011c)

Parallel zur Auswertung von Block 1 erfolgte auch die Auswertung des vorletzten Bestrahlungsprobensatzes P von Block 2, der 72 Betriebsjahre abdecken soll, obwohl sich noch ein weiterer Probensatz im RDB befindet. Grundwerkstoff und Schweißnahtproben der Schmiederinge C und D wurden nach klassischer Methode I untersucht, der Grundwerkstoff zusätzlich nach Master-Curve Methode II B. Anders als bei Block 1 erfolgte keine Untersuchung der bestrahlten Proben nach Master Curve II A. Die Ergebnisse für den Block 2 werden ebenso wie für Block 1 nur für die Master-Curve Methode II B dargestellt, siehe Abbildung 9-9.

Abbildung 9-9: KKB, Block 2, RT<sub>Ref</sub> nach Master-Curve Methode II B



Quelle: (axpo 2011d)

Die Fluenz der Materialproben wurde mit  $5,64E+19/cm^2$  bestimmt, entsprechend einer extrapolierten Laufzeit von 61 VLJ oder 67 BJ (axpo 2011d). Für die Sprödbbruchreferenztemperaturen der Materialproben ergaben sich die in Abbildung 9-10 aufgeführten Werte.

Abbildung 9-10: KKB, Block 2, Resultate der Probenprüfungen von Probensatz P

Beznau Block 2 Probensatz P , Fluenz: $5.64E 19 [cm^{-2}]$				
Werkstoff	$RT_{NDT}$ bzw. $RT_{ref}(0)$ [°C]	$\Delta T_{41}$ [K]	$RT_{ref}$ [°C]	Bestimmung der Referenztemperatur nach ENSI-B01 [2]
Schmiedering C	-10	71	61	Methode I
	-34	71	37	Methode II, Variante B
Schmiedering D	-10	72	62	Methode I
	-79	72	-7	Methode II, Variante B
Schweissgut	-35	66	31	Methode I

Quelle: (axpo 2011d)

Die Sprödbbruchreferenztemperaturen liegen ca.  $40^{\circ}C$  unterhalb denen von Ring C des Blocks 1. Die  $\Delta RT_{Ref}$  für die Versprödungsreaktion liegen ca.  $35^{\circ}C$  unter denen von Ring C. Insgesamt

scheinen die Ergebnisse der Materialprobensätze von Ring C und D des KKB 2 mit denen des Rings D von KKB 1 vergleichbar zu sein.

## 9.1.2. Befunde an den Reaktordruckbehältern der Anlage KKB

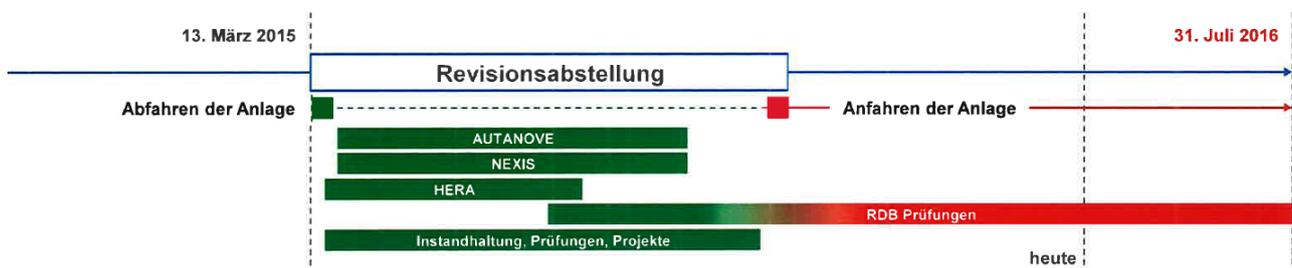
### 9.1.2.1. Befunde am RDB KKB 1

Mitte März 2015 wurde Beznau 1 zur Revision abgeschaltet. Infolge der Entdeckung von Wasserstofflockenrissen in den kernnahen RDB-Ringen der belgischen Reaktoren Doel 3 und Tihange 2 sowie diesbezüglicher WENRA-Empfehlungen (WENRA 2013) wurden auch in Beznau 1 Ultraschalluntersuchungen am Reaktordruckbehälter durchgeführt.

Im Juli 2015 führte die Entdeckung von Ultraschallanzeigen im RDB zur andauernden (Stand Juli 2017) Außerbetriebnahme des Reaktors Beznau 1, da die insbesondere im kernnahen Ring C festgestellten Materialfehler den aktuellen Sprödbrechtsicherheitsnachweis und die Einhaltung des UVEK-Außerbetriebnahme-Kriteriums in Frage stellten.

In einem Informationsgespräch für die Presse am 30. November 2015 teilte AXPO (axpo 2015b) mit, dass bewertungspflichtige Anzeigen im Grundwerkstoff des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 gefunden wurden, die eine Überprüfung des Strukturintegritätsnachweises für den RDB erforderlich machten, entsprechend der hierfür vorgelegten Roadmap (vgl. Abbildung 9-11). Dieser ursprüngliche Zeitplan konnte jedoch nicht eingehalten werden.

**Abbildung 9-11: Ursprünglicher Zeitplan für die Überprüfung des Reaktordruckbehälters von KKB, Block 1**



Quelle: (axpo 2015b)

Im Mai 2016 präsentierte Axpo auf einer 2. Informationsveranstaltung (axpo 2016b) eine neue Planung, siehe Abbildung 9-12 und teilte mit, dass sich die Erstellung des Strukturintegritätsnachweises und das Anfahren des Reaktors bis Dezember 2016 verzögere.

**Abbildung 9-12: Anpassung des Zeitplans zum „Safety Case“ des Reaktordruckbehälters von KKB, Block 1**



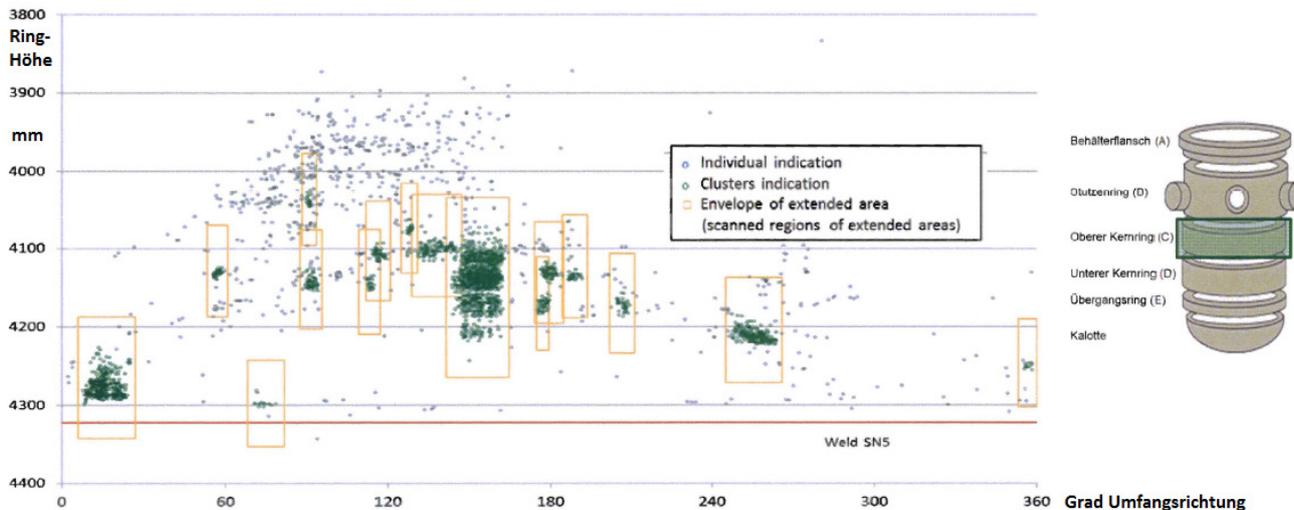
Quelle: (axpo 2016b)

Als Gründe für die Verzögerungen wurden die Schwierigkeiten bei der Beschaffung geeigneter Materialproben und die äußerste Komplexität der Prüf- und Auswertungsprozesse angeführt. Des Weiteren wurde die starke Abhängigkeit von spezialisierten Unternehmen in zeitlicher und personeller Hinsicht beklagt und die Klärung einer Vielzahl juristischer und kommerzieller Fragen geltend gemacht.

Während 2015 zunächst von 925 Anzeigen im oberen kernnahen Ring C ausgegangen worden war, ergab ein neuer Befund gemäß (axpo 2016b) für den Ring C mittlerweile noch 830 Anzeigen und zusätzlich 119 Anzeigen für den Stutzenring B. Anders als bei den belgischen Reaktoren Doel 3 und Tihange 2, deren Anzeigen auf Wasserstofflockenrisse zurückgeführt werden, geht der Betreiber bei der Interpretation der Anzeigen des RDB von KKB 1 davon aus, dass es sich um nichtmetallische Einschlüsse in Form von Aluminiumoxid handelt.

Die mit dem Mediengespräch im Mai (axpo 2016b) vorgelegten Unterlagen, siehe Abbildung 9-13, zeigen, dass sich die nichtmetallischen Einschlüsse in Clusterform insbesondere auch im Bereich der Kernnaht (Weld SN5) und des 0°-Azimuts befinden, also in dem für den Thermoschocknachweis des RDB von Block 1 wichtigen, am stärksten versprödeten und gleichzeitig hoch belasteten Bereich.

**Abbildung 9-13: KKB, Block 1, Umfangsverteilung der Ultraschallanzeigen, Ring C des Reaktordruckbehälters**



Quelle: (axpo 2016b)

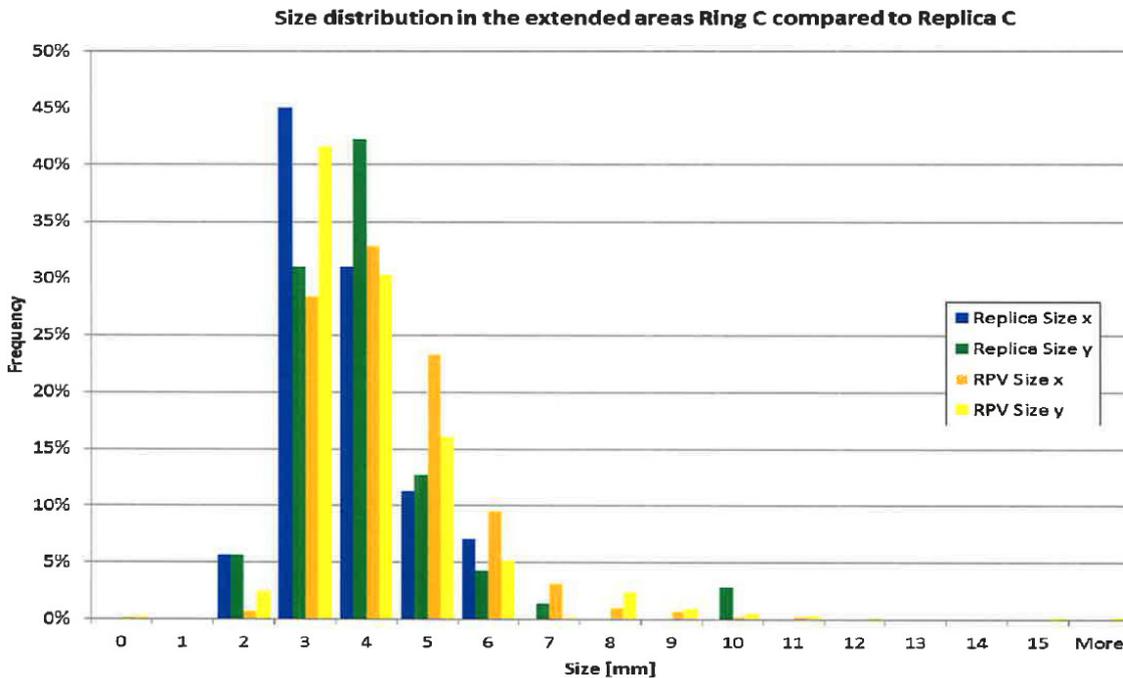
Im September 2016 meldete Axpo auf dem 3. Mediengespräch den „Durchbruch“ bei der schwierigen Suche nach repräsentativen Materialproben, die für die Führung des Integritätsnachweises benötigt werden (axpo 2016a). Axpo verkündete, dass - in Ermangelung von Originalwerkstoffproben - die entscheidenden Nachweise zur Integrität des RDB jetzt mit Hilfe einer Replika geführt werden, einer Neuanfertigung des kernnahen Rings C. Der in der englischen Schmiede Sheffield Forgemasters gegossene und geschmiedete Ring sei auf Basis der Herstellungsdocumentation und mit Parametern innerhalb der Herstellungsspezifikation gefertigt worden. Als Einflussfaktoren seien hierbei die Gusstemperatur, die Qualität des Vakuums, der Anteil des ausgestoßenen Ingots, das Ausgangsmaterial sowie die Konditionierung/Zugaben vor dem Gießen zur Beruhigung des Stahls berücksichtigt worden (axpo 2016a).

Axpo geht gemäß (axpo 2016a) davon aus, dass die Untersuchungen an der Replika frühere Annahmen bestätigen, dass die Anzeigen in Ring C des KKB 1 herstellungsbedingt sind, ihre Lage in der Zone negativer Segregation auf Aluminiumoxid-Einschlüsse schließen lasse und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen und chemische Analysen das Vorhandensein von Aluminiumoxid bestätigten.

Die Replika solle praktisch identische chemische und mechanische Eigenschaften wie der RDB Ring C von KKB 1 sowie vergleichbare Anzeigen (siehe Abbildung 9-14) aufweisen und damit die Ergebnisse der Root Cause Analyse (RCA) zur Charakterisierung der Ultraschallanzeigen validieren. Als Kriterien für die Repräsentativität der Replika werden von (axpo 2016a) chemische Eigenschaften, mechanische Eigenschaften und die Ultraschall-technische Vergleichbarkeit der Anzeigen, der sogenannte Ultraschall-Fingerabdruck angeführt. Die Nachweise zur Vergleichbarkeit des Ultraschall-Fingerabdrucks sind gemäß (axpo 2016a) noch in Bearbeitung.

Für die bruchmechanischen Untersuchungen sollen sowohl Proben ohne Einschlüsse als auch solche mit einer mittleren und einer hohen Dichte an Einschlüssen (wie bei Ring C) herangezogen werden.

**Abbildung 9-14: Vergleich zwischen den Ultraschallanzeigen der Replika mit denen von Ring C**



Quelle: (axpo 2016a)

Im November 2016 reichte Axpo die Unterlagen für den Integritätsnachweis für einen Weiterbetrieb bis 60 Betriebsjahre beim ENSI zur Prüfung ein. Noch im Dezember 2016 wollte Axpo Beznau 1 wieder anfahren.

Aufgrund von Nachforderungen des ENSI sowohl hinsichtlich weiterer Berichte als auch materialtechnischer Untersuchungen zum RDB wurde der Anfahrtermin dann aber zunächst auf März 2017, danach noch mehrmals auf April, Mai und Juni verschoben. Die aktuellen Planungen des Betreibers (Stand Juli 2017) sehen das Wiederanfahren Ende Oktober 2017 vor.

### 9.1.2.2. Befunde am RDB KKB 2

Der RDB von Beznau 2 wurde nach Entdeckung der Ultraschallanzeigen in Beznau 1 erst bei der Revision im August 2015 vom Netz genommen und mit einer entsprechenden Ultraschalluntersuchung auf ähnliche Befunde untersucht.

Zum Nachweis der fehlenden Relevanz der Anzeigen in Beznau 1 für ein sofortiges Abfahren des Blocks 2 wurden die Referenztemperaturen  $RT_{Ref}$ , berechnet nach Master-Curve Methode II B, für den führenden Ring C des RDB in verschiedenen Wandtiefen ermittelt, siehe Abbildung 9-15.

**Abbildung 9-15: Spröbruchreferenztemperatur für Ring C des RDB von Block 2 nach 54 VLJ mit Methode II B**

VLJ	Azimut [°]	RDB Wandtiefe	Fluenz E > 1 MEV [cm <sup>-2</sup> ]	RT <sub>ref, ART</sub> [°C]
54	0	Innenwand	5,07E+19	51
		1/4 T	3,22E+19	46
		3/4 T	9,74E+18	29
	30	Innenwand	2,38E+19	42
		1/4 T	1,51E+19	36
		3/4 T	4,64E+18	18

Quelle: (axpo 2015c)

In Analogie zum Vorgehen bei den belgischen Anlagenbefunden unterstellte man die belgischen Seigerungen auch in Beznau 2 und berechnete für in diesem Fall positive Anreicherungen der Bestandteile Kupfer, Phosphor und Nickel einen zusätzlichen Beitrag für die Versprödung  $\Delta RT_{Ref}$  (Seigerung) = 11,7°C an der RDB-Innenseite und  $\Delta RT_{Ref}$  (Seigerung) = 9,0°C in 1/4 Wandtiefe.

Diese zusätzlichen Deltas wurden auf die Spröbruchreferenztemperatur in Abbildung 9-15 aufgeschlagen. Somit ergaben sich maximal für 62,7°C an der Innenwand und 55°C in 1/4 Wandtiefe für den Azimut 0°. Daraus folgerte der Betreiber, dass das Außerbetriebnahmekriterium auch bei Vorhandensein vergleichbarer Anzeigen in jedem Fall nicht erreicht werden würde und daher ein vorzeitiges Abfahren des Blocks 2 nicht erforderlich sei.

Zusätzlich führte man eine probabilistische Abschätzung durch, nach der die Kernschadenshäufigkeit durch RDB-Versagen 6,8E-10 pro Jahr betragen soll.

Bei der später in der planmäßigen Revision durchgeführten Ultraschallprüfung wurden insgesamt 77 Anzeigen gefunden, von denen sich 34 im Ring C, dem oberen kernnahen Ring befinden (ENSI 2015b). Demnach handelte es sich um vereinzelt Anzeigen, wobei

*„neben meist kleinen, punktförmigen Anzeigen ohne erkennbare Ausdehnung auch etwas größere Einzelanzeigen“*

aufgefunden wurden. Zu den 77 Anzeigen teilte die Aufsichtsbehörde ENSI weiterhin via Twitter mit:

*„Max. Grösse für ein Anzeigengebiet: 20 x 50 mm (Umfang x Höhe). Das sind ca. 6% der zulässigen Fläche gem. ASME XI, IWB-3510. Die Anzeigen haben keine Tiefenausdehnung. Daher sind sie auch unter konservativer Annahme sicherheitstechnisch zulässig.“*

Gemäß (ENSI 2015b) wurden die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen durch den Schweizerischen Verein für technische Inspektionen (SVTI) überprüft und eigene bruchmechanische Bewertungen durchgeführt.

Im Dezember 2015 erteilte ENSI Beznau 2 nach vier Monaten Revision die Freigabe zum Wiederanfahren.

### 9.1.2.3. Anwendungsgrenzen des Master-Curve Verfahrens

Das Mitte der 80er Jahre entwickelte und in ASTM E1921 seit 2005 standardisierte Master-Curve Verfahren des Finnen Wallin wird zur Charakterisierung des Zähigkeitszustandes von Reaktordruckbehältern eingesetzt, obwohl es ursprünglich für einen wesentlich begrenzteren Prüfraum entwickelt wurde. Sein Ansatz beschreibt die Spröbruchwahrscheinlichkeit unter Verwendung einer werkstoffunabhängigen Kurvenform der Bruchzähigkeit  $K_{Jc}(T)$ , genannt Master-Curve (MC). Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren modelliert die MC den Spröbruch-Übergangsbereich zwischen Tief- und Hochlage der Bruchzähigkeit und grenzt ihn probabilistisch ein. Dabei werden zur Bestimmung der Risswahrscheinlichkeit die mikroskopischen Bruchvorgänge im Werkstoff entsprechend dem Bruchmechanismus eines transkristallinen Spröbruchs (eindimensional an der Spannungsspitze der Rissinitiierung) unterstellt und mikroskopisch sowie makroskopisch homogenes Material vorausgesetzt. Die Kurvenform der MC basiert auf der Weibullstatistik. Die Kurvenform der MC wird über der Temperatur für alle ferritischen Stähle eines gewissen Festigkeitsbereichs als gleich postuliert und durch den einzigen werkstoffunabhängigen Parameter, die Referenztemperatur  $T_0$  justiert. Werden die Randbedingungen des MC-Modells nicht erfüllt, ergeben sich Anwendungsprobleme, die nicht immer lösbar sind.

Bei makroskopischer Inhomogenität im Stahl führt die Master Curve-Auswertung zu einer überdurchschnittlich großen Datenstreuung. Die deshalb eingeführte Anwendung der dreistufigen SINTAP-Prozedur bei Inhomogenitäten führt zu konservativeren Werten bei der Spröbruchreferenztemperatur. Alternativ werden daher die bimodale Methode (BM) oder die multimodale Methode (MM) favorisiert, je nach Anzahl der Inhomogenitätsbereiche.

Eine Anwendung der Master Curve ist dann in Frage zu stellen, wenn andere Bruchmechanismen als der transgranulare Spaltbruch das Spröbruchverhalten beeinflussen. Intergranulare Brüche (IGF) bzw. Korngrenzenbrüche (duktile Trennungen entlang der Korngrenzen) können aufgrund thermischer Alterung oder starker Bestrahlung beginnen, das Bruchverhalten im Werkstoff zu dominieren oder signifikant zu beeinflussen. Die IAEA verweist in diesem Zusammenhang darauf, dass hoch bestrahlte Stähle (mit hoher  $T_0$ -Temperatur) eine Bruchzähigkeits-Temperatur-Kurve aufgewiesen hätten, die deutlich von der unterstellten Master-Curve abwich, während die Kurvenabweichung bei unbestrahltem Stahl vernachlässigbar war (IAEA 2009). Falls der dominierende Bruchmechanismus intergranularer Spröbruch (IGF) ist, wie in stark verstrahlten oder versprödeten Stählen beobachtet, sei eine konservative Bewertung der Bruchzähigkeit erforderlich. Generell kritisiert wird in (IAEA 2009) der Umgang mit derartigen Stählen, die bei Abweichungen von der MC als Ausreißer charakterisiert, aber nicht hinsichtlich potenzieller Ursachen wie IGF analysiert wurden.

Daneben können auch Unterschiede zwischen RDB und Probe bei den Constraints (Mehrachsigkeit des vorliegenden Spannungszustands an der Rissspitze), Prüfungen außerhalb des  $T_0 \pm 50$  K-Temperaturfensters oder Werkstoffe mit sehr hoher Zähigkeitslage gegen die Anwendung der MC sprechen.

## 9.2. Stellungnahme

Der RDB ist die sicherheitstechnisch wichtigste Komponente im Kernkraftwerk, die nicht austauschbar ist. Sein Versagen muss ausgeschlossen werden, da es nicht beherrscht wird. Dies begründet die besondere Bedeutung der Qualität bei der Herstellung des RDBs, die auch eine wesentliche Voraussetzung zur Vermeidung von Unsicherheiten bei der Nachweisführung zum RDB darstellt.

### 9.2.1. Versprödung der RDBs

Beide Reaktordruckbehälter der Anlage KKB weisen bereits eine im internationalen Vergleich sehr hohe Versprödung auf. Betreiber und Aufsichtsbehörde führen die Unterschiede im Versprödungszustand der kernnahen Ringe von Beznau 1 und 2 auf herstellungsbedingte Unterschiede wie zum Beispiel eine unterschiedliche Wärmebehandlung der Schmiedeteile beider Blöcke sowie eine ca. 10% höhere Neutronenfluenz am RDB von Block 1 zurück. Dies erklärt jedoch nicht die Versprödungsunterschiede der beiden kernnahen RDB-Ringe des Blocks 1 untereinander. Die Sprödbruchreferenztemperaturen des Rings D von Block 1 in Abbildung 9-5 und der Ringe C und D von Block 2 Abbildung 9-8 weisen Werte zwischen 70 und 80°C auf und sind somit vergleichbar hinsichtlich ihrer Versprödungsreaktion, während die Sprödbruchtemperatur des Rings C erheblich höher ausfällt.

Es ist davon auszugehen, dass die Legierungen der Werkstoffe beider RDBs von den im ASME-Code vorgegebenen Materialzusammensetzungen abweichen und vergleichsweise hohe Kupfer-, Nickel- und Phosphoranteile aufweisen, die sich schädlich auf den Versprödungsgrad der RDBs auswirken. Insbesondere für die kernnahen Ringe von Beznau 1 sind die genauen Materialzusammensetzungen nicht bekannt und sollten für eine transparente Nachvollziehbarkeit des Versprödungszustands des RDBs veröffentlicht werden. Der von den anderen drei kernnahen Ringen auffallend hoch abweichende Versprödungszustand des Rings C ist vor diesem Hintergrund vermutlich vorwiegend auf eine besonders ungünstige Materialzusammensetzung bzw. Probleme beim Guß oder bei der Wärmebehandlung zurückzuführen.

Diese Sachverhalte weisen auf ungünstige Herstellungsbedingungen und vergleichsweise ungünstige Materialzusammensetzungen der RDBs, insbesondere bei Ring C von Block 1, hin und stellen somit einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Abbildung 9-5 verdeutlicht, dass die letzte Voreilprobe von KKB 1 weit oberhalb der bis dahin prognostizierten Verlaufskurve der Materialversprödung liegt. Die in diesem Bild dargestellte Verlaufskurve wäre nach oben nachjustieren. Auf Basis der Materialprobensätze wird die Prognose für den Langzeitsicherheitsnachweis des RDBs abgegeben. An den Langzeitsicherheitsnachweis des RDB sind höchste Qualitätsanforderungen zu stellen. Die Ergebnisse der Prognose für die Versprödung des Rings C bei 54 VLJ vor Auswertung des letzten Materialprobensatzes waren jedoch offensichtlich falsch. Insofern sollte der Betreiber darlegen, wie belastbar zukünftige Prognosen sein können, bzw. wie hoch die Unsicherheiten seiner neuen Prognose sind, insbesondere, da keine weiteren Probensätze mehr zur Verfügung stehen.

Die Auswertungen des letzten, 2010 in KKB 1 aus dem Reaktordruckbehälter entnommenen Materialprobensatzes T zeigen eine unerwartet hohe Versprödungszunahme, die von den bis dahin vorgenommenen Prognosen des Versprödungsverlaufs nicht abgedeckt wird. Eine seitens ENSI von Axpo geforderte Erklärung hierfür liegt uns nicht vor. Es sollte begründet dargelegt werden, dass sich hieraus keine Hinweise auf einen Cliff-Edge-Effekt herleiten lassen, wie beispielsweise einen Late Blooming Effect.

Es wurde auch bei dem zur Bewertung des RDB von Doel 3 in Belgien herangezogenen, zunächst als repräsentativ bezeichneten Probenmaterial VB395 eine untypisch hohe Versprödung beobachtet. Hierbei wurde auch „nonhardening embrittlement“ und die Abnahme von Spaltbruchmechanismen festgestellt. Beides weist auf ein verändertes Sprödbruchverhalten, wie beispielsweise intergranularen Sprödbruch hin, siehe hierzu auch Kap. 9.1.2.3. (ORNL 2015) stellt fest:

*„The material (VB395) also exhibited a substantial degree of additional embrittlement, which appears to be abnormal nonhardening embrittlement, the root cause for which has not yet been determined even with an international expert panel assessment. Additionally, a separate part of the VB395 forging, designated Block 5, exhibited very disparate behavior in that the  $\Delta T_0$  was extremely low even at the relatively high fluence of  $2 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, and then showed very rapid increase in  $\Delta T_0$  with increasing fluence at the same rate of increase shown by the specimens in the out-of-flakes and in the between-flakes regions.“*

Die Auswertung des letzten Materialprobensatzes im Sommer 2011 hat deutlich gemacht, dass die Bestrahlungsreaktion des RDB-Materials von KKB 1 mittlerweile offenbar stärker ausfällt, als bis zum März 2011 noch angenommen. Legt man eine neue blaue Kurve ART Ring C durch die letzte, ergänzte Materialprobe in Abbildung 9-5, wird deutlich, dass die Sprödbruchreferenztemperatur an der RDB-Innenseite nicht mehr mit 96°C wie 2010, sondern heute eher im Bereich von 103°C liegen wird, wenn man die aktuellen Fluenz-Werte der Axpo nach Auswertung der letzten Materialprobe für die RDB-Innenseite ( $5,6 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>) ansetzt. Demnach ergäbe sich für ein Fluenz von ca.  $3,6 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> nach 54 VLJ bei ¼ Wandstärke (vgl. Abbildung 9-4) ein Wert von ca. 98°C. Auch wenn man das für Methode I und Methode II B gleichgroße  $\Delta RT_J = 15^\circ\text{C}$  zu dem für Methode II B nach 60 BJ in ¼-Wandtiefe ausgewiesenen Wert von  $RT_{T0} = 83^\circ\text{C}$  addiert, erhält man 98°C. Der Grenzwert in ¼ Wandtiefe von 93°C (gemäß UVEK-Verordnung) wäre somit nach klassischer Methode um 5°C überschritten. Methode II B kommt hierbei auf 83°C. Der Außerbetriebnahmegrenzwert würde damit schon wesentlich früher als nach 60 Betriebsjahren erreicht. Somit kann die Außerbetriebnahme des KKB 1 gemäß (UVEK 2008) nur durch Anwendung der Master-Curve-Methode II verhindert werden.

Seine Einschätzung zur Konservativität des Klassischen Verfahrens nach Methode I gibt ENSI in (ENSI 2010a) folgendermaßen:

*„Es ist international anerkannt, dass die Auswertung der Materialdaten der Bestrahlungsproben nach dem klassischen  $RT_{NDT}$ -Verfahren zu konservativen Ergebnissen führt. Die Höhe der Konservativitäten sind bereits abgebaut worden, indem heute nur noch im Vergleich zur  $K_{IC}$ -Grenzkurve (Rissinitiierung bei statischer Belastung) ausgewertet wird (früher auch für dynamische Rissinitiierung und Rissstop)“.*

Somit wird selbst das klassische Verfahren nicht mehr früheren Konservativitäten gerecht.

Die Master-Curve-Methode II wurde erst 2011 vom ENSI als Berechnungsmethode für die Sprödbruchreferenztemperatur gemäß (UVEK 2008) in der Richtlinie (ENSI 2011a) eingeführt. Während das klassische Kerbschlagbiegeverfahren nach Charpy ein seit Jahrzehnten erprobtes und konservativ empirisches Verfahren darstellt, wird das gemäß (ENSI 2010a) auf probabilistischer Grundlage basierende Konzept der Masterkurve nach ASTM E 1921 in Verbindung mit den ASME Code Case N-629 und N-631 erst in den letzten Jahren angewandt. In die KTA 3201 wurde es erst nach erheblicher Diskussion mit und von der Materialprüfanstalt Stuttgart formulierten Einschränkungen aufgenommen, vgl. Abschnitt 3.3.3 in der Dokumentationsunterlage (KTA 2013).

Ursprünglich, bei der Konzepteinreichung zum Umgang mit dem Sprödbruchsicherheitsnachweis sollte das Master-Curve Konzept nur zur Quantifizierung der in diesem Konzept enthaltenen Sicherheitsmarge für die RDB-Grundwerkstoffe dienen (axpo 2011a). Die Anwendung der Master-Curve-Methode II B zur Ermittlung der Referenztemperatur bedeutet eine erhebliche Reduzierung der bisherigen Sicherheitsmarge. Mit Anwendung der Master-Curve-Methode II A setzt sich der Abbau von Sicherheitsmargen weiter fort.

Da die Master-Curve-Methode nachträglich eingeführt wurde, lagen in Beznau 1 keine hierfür speziell geeigneten und bestrahlten Voreilproben im Reaktor vor. Es musste deshalb auf sogenannte Wedge Open Loaded Proben (WOL-25X-Proben) zurückgegriffen werden, die durch ihre geringe Größe gekennzeichnet sind. Weiterhin wurden Dreipunktbiegeproben (PCCV-Proben) von bereits in den Kerbschlagbiegeversuchen zerstörten Materialproben verwendet, die mittels Verbundprobentechnik rekonstruiert wurden, um sie erneut testen zu können.

Erst in den letzten Jahren werden bei Mangel an geeignetem Probenmaterial zunehmend Versuche an vergleichsweise kleinem oder erneut verschweißtem Probenmaterial durchgeführt. Derartige Verfahren bedingen ein striktes Einhalten einer Reihe von Randbedingungen und eine entsprechende Anzahl an Proben. Nicht für alle Anwendungsfälle liegen qualifizierte Regelwerksvorgaben vor. Es mangelt noch an systematischen Studien, die die verwendeten Rekonstruktionsmethoden und die kritischen Parameter untersuchen, die Schweißnahtqualität und den Wärmeeintrag beeinflussen können (Roudén et al. 2015).

Angesichts der geringen verbleibenden Sicherheitsmargen insbesondere für Ring C des Blocks 1 sollte für die Anwendung der Methoden A und B nach dem Master-Curve Verfahren plausibel und nachvollziehbar detailliert dargelegt werden, unter welchen Randbedingungen das Master-Curve-Verfahren angewendet wurde, welche Materialbeprobungen (Anzahl, Größe und Behandlungshistorie) durchgeführt wurden und unter welchen Voraussetzungen welche Sicherheitsmargen festgestellt wurden.

Die vierfach symmetrische Anordnung der Brennelemente im Reaktordruckbehälter verursacht, dass die RDB-Wände der Beznau-Reaktoren besonders in den Umfangsbereichen oder auch Azimuten  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  am stärksten bestrahlt werden. Der Azimut  $0^\circ$  befindet sich zusätzlich um  $30^\circ$  versetzt unterhalb des Kühlwasserstutzens, weshalb er bei Kühlmittelverluststörfällen bei gleichzeitig höchster Versprödung den stärksten Belastungen ausgesetzt ist.

Der für den Nachweis der Sprödbrechtsicherheit einzuhaltende Grenzwert von  $93^\circ\text{C}$  am Azimut von  $0^\circ$  des Rings C resultiert aus der Betrachtung des Leck-Störfalls mit einem  $70\text{ cm}^2$  heißseitigen Leck für die Thermoschockanalyse. Er stellt damit einen restriktiveren Grenzwert als das UVEK-Außerbetriebnahmekriterium dar, da er an der RDB-Innenseite einzuhalten ist.

Bei einer Berechnung mit der konservativen Methode I war dieser Grenzwert mit  $96^\circ\text{C}$  um drei Grad überschritten. Der Nachweis lässt sich deshalb auch hier nur noch unter Berücksichtigung der Master-Curve-Methoden II B ( $89^\circ\text{C}$ ) und II A ( $80^\circ\text{C}$ ) führen, wobei der Abstand der Sprödbbruchreferenztemperatur zum Nachweiskriterium auch nach Methode II B bereits sehr gering ist.

Bei dem von Axpo im Dezember 2012 dem ENSI hierzu vorgelegten und aktualisierten Sprödbrechtsicherheitsnachweis wurden zusätzliche Randbedingungen geändert bzw. ergänzt. Insbesondere eine Neuberechnung von Constraint-Effekten hat dabei die anzusetzenden Sprödbbruchreferenztemperaturen nochmals weiter abgesenkt. Auch dies stellt wiederum einen Abbau bislang vorhandener Konservativitäten und damit bisher vorhandener Sicherheitsmargen dar.

Die dargelegten Sachverhalte verdeutlichen, dass der RDB von Beznau 1 bereits vor der Entdeckung der Ultraschallanzeigen eine im internationalen Vergleich mit gleichalten Reaktoren sowie im Vergleich mit Beznau 2 sehr hohe Versprödung aufwies. Im Rahmen der Bestimmung der Sprödbbruchreferenztemperatur wurden bereits zahlreiche, in den klassischen Verfahren

enthaltene Konservativitäten abgebaut, die zusätzliche Sicherheitsmargen gewährleisten würden. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

### 9.2.2. Befunde in den Reaktordruckbehältern

Die im Juli 2015 entdeckten Befunde verschärfen das Nachweisproblem zur Sprödbruchsicherheit des RDBs erheblich:

- Es ist ein neuer Strukturintegritätsnachweis zu führen, der berücksichtigt, dass im kernnahen Ring C sowie im Stutzenring des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 Inhomogenitäten vorliegen, die in bestimmten Bereichen im RDB-Werkstoff andere Materialeigenschaften verursachen können, als bisher vorausgesetzt.
- Der ohnehin stark versprödete Ring C von Beznau 1 weist die gravierendsten Befunde zur Versprödung auf. Im Bereich des sicherheitsrelevanten Azimuths  $0^\circ$  befindet sich zudem ein Cluster an vermutlich nichtmetallischen Einschlüssen.
- Da der Nachweis mit der konservativsten Methode I zur Ermittlung der Sprödbruchreferenztemperatur bereits vor den Befunden nicht mehr geführt werden konnte, kann er nunmehr nur noch nach dem Master-Curve Verfahren Methode II geführt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten:
  - Das Master-Curve-Verfahren ist in der klassischen Form nur zulässig, wenn keine Inhomogenitäten im RDB-Werkstoff vorhanden sind. Das Master-Curve-Verfahren muss damit in angepasster und konservativerer Form angewendet werden. Eine Anpassung des MC-Verfahrens mittels der dreistufigen SINTAP-Prozedur oder des bimodalen bzw. multimodalen Verfahrens wäre hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit nachzuweisen. Dabei wäre insbesondere auszuschließen, dass andere Bruchmechanismen das Sprödbruchverhalten des RDB beeinflussen könnten oder dass andere Gründe vorliegen, die ein konservatives Ergebnis der Auswertung in Frage stellen. In diesem Zusammenhang wäre nachzuweisen, dass die Anwendbarkeit des MC mit den entsprechenden Prozeduren für inhomogene Werkstoffe bei den hier vorliegenden – für Aluminiumoxid vergleichsweise großen - nichtmetallischen Einschlüssen ausreichend validiert ist.
  - Bei unerwünschten Inhomogenitäten ist von der Notwendigkeit einer Anpassung der Sprödbruchreferenztemperatur durch einen Temperatureaufschlag  $\Delta T$  auszugehen.
  - Es werden geeignete, gemäß ASME-Code am besten aus dem Originalwerkstoff bestehende, vergleichbare Materialproben mit Aluminiumoxideinschlüssen benötigt, um den Einfluss der Inhomogenitäten bestimmen zu können. Geeignete Proben aus dem Originalwerkstoff liegen dem Betreiber nicht mehr vor.
  - Der Sicherheitsnachweis hängt jedoch entscheidend von geeigneten Materialkennwerten ab.
  - Es bestehen hohe Unsicherheiten hinsichtlich der Repräsentativität der Replika, da die Herstellungsbedingungen des RDB von Beznau 1 nicht vollständig bekannt sind. Die Vergleichbarkeit der Einschlüsse von Ring C und Replika kann nur durch einen Abgleich der Ergebnisse von Ultraschalluntersuchungen bewertet werden.
  - Der Replika fehlt die Bestrahlungs- und Ermüdungshistorie von 46 Jahren Betrieb des KKW Beznau 1. Durch hohe Bestrahlung, sowie Materialermüdung werden mikroskopische Materialveränderungen im RDB-Werkstoff verursacht, die das Sprödbruchverhalten verändern können. Die Übertragbarkeit von Ergebnissen der Replika ist vor diesem Hintergrund ebenfalls zu validieren. Es finden sich keine Forschungsergebnisse, die die Anwendbarkeit einer derartigen Vorgehensweise dokumentieren.

Die in den RDBs der Anlage Beznau vorgefundenen Anzeigen stellen weitere Hinweise auf Mängel in der Herstellungsqualität der RDBs und damit einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar. Der Sicherheitsnachweis für die Integrität des Reaktordruckbehälters von Beznau 1 lässt sich vor diesem Hintergrund, wenn überhaupt, nur noch mit erheblich reduzierten Sicherheitsmargen führen.



## 10. Weitere sicherheitsrelevante Schwachstellen

Im Folgenden werden als Basis für die weitere Untersuchung zunächst die wesentlichen Ergebnisse aus (Brettner et al. 2012) wiedergegeben. Daran anschließend werden, soweit zu diesem Themenfeld vorliegend, Erkenntnisse aus Darstellungen des Betreibers sowie der Aufsichtsbehörde zusammengefasst. Weiterhin wird u. a. auf Basis von (ENSI 2012a, 2013a, 2014a, 2014d, 2014c, 2015a, 2016g) dargestellt, welche Auflagen bzw. Nachrüstungen mit Relevanz für die hier identifizierten Schwachstellen zwischenzeitlich beschlossen wurden.

### 10.1. Identifizierte Schwachstellen gemäß (Brettner et al. 2012)

Hinsichtlich der Vermaschung der Redundanzen und damit auch der Beherrschbarkeit eines passiven Einzelfehlers ist der pro Block nur einmal vorhandene Borwassertank (BOTA) von besonderer Relevanz. Eine Unverfügbarkeit des BOTA würde im KKB zu einem Verlust des Wasserinventars führen, das für die Sperrwasserversorgung der Reaktorhauptpumpen, die Ergänzung von Kühlmittelverlusten oder die Einstellung des Rezirkulationsbetriebs erforderlich ist.

Im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung der RSK wurden für die deutschen Anlagen auch zivilisatorische Einwirkungen wie ein Flugzeugabsturz auf die Anlage analysiert. Im Rahmen des EU-Stresstests der Anlage Beznau wurden solche Szenarien nicht betrachtet. Es liegen daher keine expliziten Aussagen zur Widerstandsfähigkeit der Systeme, Strukturen und Komponenten der Anlage Beznau gegen derartige Einwirkungen vor. Die Abhängigkeit der zentral wichtigen Sicherheitsfunktionen der Sperrwasserversorgung der Reaktorhauptpumpen, der Ergänzung von Kühlmittelverlusten (z. B. bei unterstellten Leckagen an den Reaktorhauptpumpen) oder der Einstellung des Rezirkulationsbetriebs von nur einem Vorratsbehälter pro Block bewerten wir vor diesem Hintergrund als eine sicherheitstechnisch besonders relevante Schwachstelle.

### 10.2. Darlegungen des Betreibers

Mit dem Schreiben (Karrer 2012) nimmt der Betreiber des Kernkraftwerks Beznau in knapper Form zum Gutachten des Öko-Instituts von 2012 (Brettner et al. 2012) Stellung. Er verweist darauf, dass die Angaben zu den blockübergreifenden Versorgungsmöglichkeiten der Notstandssysteme oder dem Schutzgrad des Borwassertanks nicht die Gegebenheiten in Beznau widerspiegelt. Genauere Ausführungen hierzu enthält das Schreiben jedoch nicht.

In (Richner 2016) werden wesentliche Nachrüstungen an der Anlage Beznau in Reaktion auf die Unfälle in Tschernobyl und Fukushima dargestellt. Als Nachrüstungen in der Vergangenheit wird dabei u. a. der Austausch vorhandener Einrichtungen durch neue, so zum Beispiel des Borwassertanks samt Gebäude genannt.

In (axpo 2011b) gibt der Betreiber an, dass gemäß der vertraulichen Untersuchungen nach dem 11. September 2001 das Reaktorgebäude des KKB einen hohen Schutzgrad gegenüber dem Absturz eines Passagierflugzeugs aufweist. Demgegenüber ist der Pool-Bereich des Brennstofflagerbeckens nochmals wesentlich massiver gebaut als die Betonhülle des Reaktorgebäudes und durch umliegende Gebäude gegen einen Direkttreffer weitgehend abgeschirmt.

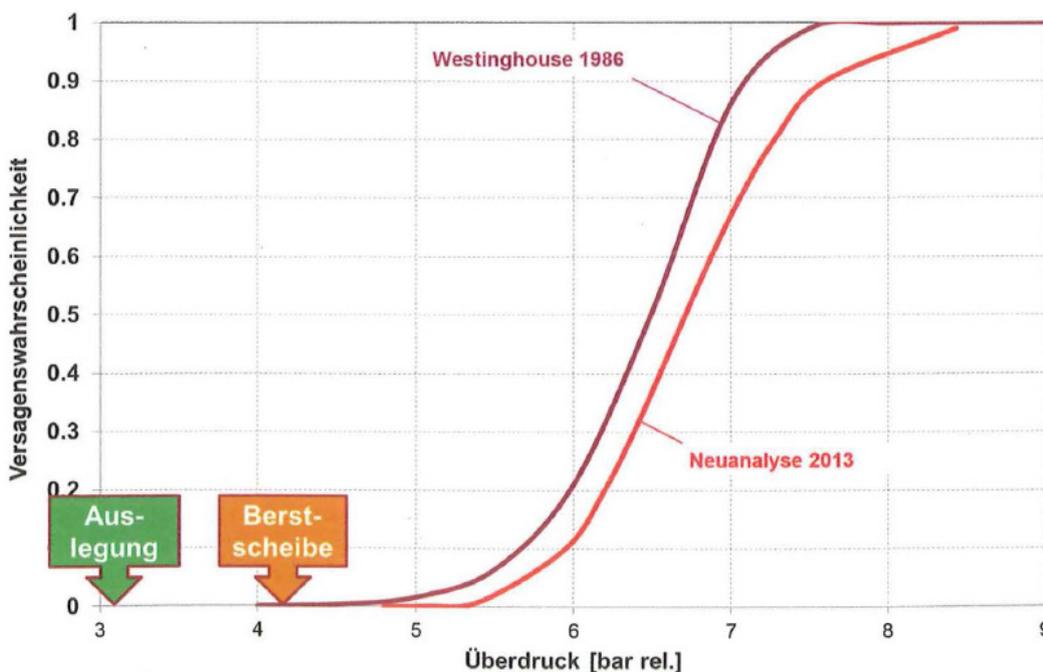
Der Betreiber stellt hinsichtlich der neuen, autarken Notstromversorgung (AUTANOVE) fest (axpo 2015a), dass mit der Inbetriebsetzung der zwei Notstromaggregate für Block 1 eine zusätzliche erdbeben- und überflutungssichere Notstromversorgung geschaffen wird, wobei in zwei

gebunkerten, auch gegen Flugzeugabstürze geschützten Gebäuden insgesamt vier leistungsstarke Dieselaggregate inklusive Hilfssystemen und zugehöriger Infrastruktur für eine Autarkiezeit von sieben Tagen Vollastbetrieb untergebracht sind. Gemäß (Richner 2016) erfolgte des Weiteren die Installation einer Grundwasser- und einer Sperrwasserpumpe zum Aufbau eines weiteren, erdbebensicheren Strangs der Kernkühlung.

Nach (Richner 2016) ist das Schutzkonzept des KKB zur Wasserstoffbeherrschung vom Betreiber überprüft und als im Grundsatz robust bewertet worden. Das ENSI habe lediglich eine geringfügige Erhöhung der Anzahl passiven Wasserstoff-Rekombinatoren im Containment gefordert.

Speziell auf der Sicherheitsebene 4b, bei welcher die Kernkühlung versagt habe und daher der Einschluss der Reaktivität von besonderer Bedeutung sein, komme der hohen Robustheit des Sicherheitsbehälters nach (Richner 2016) eine zentrale Rolle zu. Für den Auslegungsdruck des SHB der Anlage KKB wird demnach ein Wert von etwas über 3 bar<sub>ü</sub> angegeben, ein Versagen sei mit hoher Wahrscheinlichkeit erst bei Überdrücken von mehr als 7 bar<sub>ü</sub> zu erwarten, vgl. Abbildung 10-1.

**Abbildung 10-1: Sicherheitsreserven des Containments am Beispiel des KKB gemäß (Richner 2016)**



Quelle: (Richner 2016, Abb. 4)

### 10.3. Darlegungen der Aufsichtsbehörde

Gemäß (ENSI 2014f) wurden Nachweise von Beznau entsprechend schweizerischem Regelwerk und in Anlehnung an die internationalen Standards der IAEA dahin gehend erbracht, dass bei passiven Komponenten auf die Annahme eines Einzelfehlers verzichtet werden kann, da diese die geforderte hohe Qualität besitzen und keinem latenten Schädigungsmechanismus unterliegen. Von regulatorischer Seite besteht daher nicht die Anforderung, einen passiven Einzelfehler z. B. in der Versorgung der verfahrenstechnischen Einrichtungen aus dem BOTA zu unterstellen.

Gemäß (UVEK 2009) gilt, dass hinsichtlich der Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes die durch den Absturz induzierten Erschütterung von Anlageteilen, Treibstoffbrände (inkl. Rauchentwicklung), Explosionen und Trümmerwirkung zu berücksichtigen sind. Dabei ist als Lastannahme von dem

*„zum Zeitpunkt des Baubewilligungsgesuchs im Einsatz befindlichen militärischen oder zivilen Flugzeugtyp zu berücksichtigen, der unter realistischen Annahmen die grössten Stosslasten auf Gebäude ausübt“.*

Die Notwendigkeit einer Berücksichtigung eines Flugzeugabsturzes bei kerntechnischen Anlagen wird auch in (Bumann 2014) grundsätzlich bestätigt, es wird dort auch festgehalten, dass die theoretischen Grundlagen für eine flugzeugabsturz sichere Anlage vorhanden sind und in der Praxis bereits derartige Anlagen realisiert wurden.

Gemäß (ENSI 2016b) gilt, dass Strukturen, Systeme und Komponenten für auf der Sicherheitsebene 3 erforderliche Funktionen gegen die zum Zeitpunkt ihrer Errichtung von der Aufsichtsbehörde akzeptierten Gefährdungsannahmen durch naturbedingte und zivilisatorische Einwirkungen auszulegen oder zu schützen sind. Gemäß (ENSI & TFK 2015) wurden die Baubewilligungsgesuche für die Blöcke 1 und 2 der Anlage KKB am 2. November 1965 bzw. am 7. November 1969 eingereicht. ENSI stellt in (ENSI & TFK 2014c) fest, dass für die Anlage Beznau bei ihrer Erstellung keine Auslegungsanforderung bezüglich eines Flugzeugabsturzes bestand.

Die ENSI-Richtlinie (ENSI 2009b) spezifiziert die im Rahmen probabilistischer Analysen zum Flugzeugabsturz zu berücksichtigenden Flugzeugkategorien, wobei einerseits die Absturzhäufigkeiten und andererseits die ausgelösten Schäden erfasst werden müssen. Nach (ENSI 2016i) schätzt das KKB das Risiko für einen Absturz eines Luftverkehrsfahrzeuges auf das Betriebsgelände aufgrund der probabilistisch bestimmten Absturzhäufigkeiten als sehr gering ein.

Ein vorsätzlicher Flugzeugabsturz ist gemäß (ENSI & TFK 2015) seit dem 27. September 2001 detailliert zu betrachten.

In der Stellungnahme zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlich herbeigeführten Flugzeugabsturz kam die HSK gemäß (ENSI 2016i) für das KKB zum Ergebnis, dass bei mittleren Geschwindigkeiten eines Passagierflugzeuges ein ausreichender Schutz der im Sicherheits- und Notstandsgebäude installierten Einrichtungen gegen die Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes besteht. Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass die Tragfähigkeit und Dichtheit des Sicherheits- und Notstandsgebäudes auch nach einem größeren Kerosinbrand erhalten bleibt. Auch sind die Brennelemente in den Brennelementlagerbecken gut geschützt und die Kühlung kann notfalls längerfristig mittels einfacher Notfallschutzmaßnahmen sichergestellt werden.

ENSI stellt in (ENSI 2011d; ENSI & TFK 2014c) fest, dass Detailangaben zur Flugzeugabsturz-Sicherheit von Kernkraftwerken sicherungsrelevant und deshalb vertraulich sind. Bei einem vorsätzlichen Absturz eines Passagierflugzeuges ist grundsätzlich mit schweren Personen- und Sachschäden in der Anlage zu rechnen, ein Aufprall müsse allerdings mit einer erhöhten bis hohen Geschwindigkeit erfolgen, damit eine lokale Durchdringung des Reaktorgebäudes möglich ist. Grenzlast-Untersuchungen für die Anlage KKB zeigen gemäß (HSK 2003) jedoch, dass die Auslegung gegen den Absturz einer Boeing 707 mit einer Geschwindigkeit von 370 km/h, wie sie bei der Projektierung neuerer Schweizer Anlagen gefordert wurde, erfüllt wird. Da Beznau mit autarken, gebunkerten Notstandssystemen nachgerüstet wurde, weise die Anlage weltweit gesehen einen sehr hohen Sicherheitsstandard auf. Nach (ENSI & TFK 2014b) ist für bestehende Kernkraftwerke kein Vollschutz gegen Flugzeugabsturz nachzuweisen. Gemäß der Anforderungen

in (ENSI 1986) dürfen die vom Flugzeugaufprall betroffenen Wände für einen Vollschutz eine Wandstärke von 1,50 m nicht unterschreiten.

Gemäß (ENSI 2013c) sind die 2003 erstellten Analysen zum gezielten Flugzeugabsturz zu aktualisieren. Die Verfügung des ENSI (ENSI 2013d) verlangt die Vorlage neuer Untersuchungsergebnisse bis Ende 2014. Es liegen nach unserem Kenntnisstand hierzu bislang jedoch keine öffentlich verfügbaren Informationen vor.

In 1999 wurde gemäß (ENSI 2016i) eine erhöhte Korrosion der Stahldruckschale des Containments im Übergangsbereich des zylindrischen Teils zur Bodenkalotte festgestellt. Als Ursache wird eine erhöhte Feuchtigkeit sowohl aus Leckagen aus der Betriebsgeschichte als auch aufgrund der während Revisionen gefluteten Reaktorgrube angegeben. Die Korrosionserscheinungen sind flächig und weisen bei der Anlage KKB 1 die größten Korrosionstiefen von 4 mm an der Innenwand und 5,2 mm an der Außenwand der Stahldruckschale auf (ENSI 2016i). Ein in 2012 aufgebauter kathodischer Korrosionsschutz wurde für die Außenseite der Stahldruckschale als ausreichend wirksam bewertet, nicht jedoch für Innenseite. Weitere Maßnahmen werden vom KKB noch durchgeführt. Gemäß einer Überprüfung des KKB ist auch bei unterstelltem weiterem Korrosionsabtrag ausgehend vom bisherigen Zustand der Stahldruckschale eine ausreichende Sicherheitsmarge auch bei 60 Betriebsjahren sichergestellt. Das ENSI begrüßt die bisher von KKB durchgeführten Maßnahmen zur Identifikation und Reduktion der Korrosionsschäden und wird im Rahmen seiner Auflage zum Langzeitbetrieb der Anlage diese weiter verfolgen (ENSI 2010c, 2016i).

Weiterhin stellt das ENSI fest, dass der Betreiber eine Requalifikation der Stahldruckschale des Containments von ursprünglich 2,62 bar auf den auf 3,1 bar erhöhten Auslegungsdruck durchgeführt hat. In seiner Bewertung zur Level-2 PSA des Betreibers stellt das ENSI fest, dass es bezüglich der neuen Containment-Tragfähigkeitsanalyse noch Unklarheiten gibt, welche einen Einfluss auf die ermittelte Tragfähigkeit haben können (ENSI 2016i, S. 318). Gemäß (ENSI 2016i, S. 311) soll dieser Einfluss jedoch gering sein.

#### 10.4. Auflagen und Nachrüstungen

Nach (ENSI 2014d, ENSREG 3.2.7) sollte in KKB ein zusätzliches, robustes Sperrwassersystem für die Dichtungen der Reaktorhauptpumpen als Bestandteil der Notstandssystem nachgerüstet werden. Gemäß (ENSI 2016i) wurde im Rahmen des Projekts AUTANOVE für die Sperrwasserversorgung eine zusätzliche seismisch qualifizierte Sperrwasserpumpe, die über die neu aufgebaute Notstromschiene elektrisch versorgt wird, errichtet.

Nach (ENSI 2012a) wurden die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke dazu aufgefordert, die Möglichkeit einer Freisetzung von Wasserstoffgas in Räume außerhalb des Primär-Containments und eine damit verbundene Ansammlung in einem gefährdenden Ausmaß zu untersuchen. (ENSI 2013a) forderte die Betreiber auf, bis Ende 2013 Analysen bezüglich der Gefährdung durch Wasserstoff bei schweren Unfällen unter Berücksichtigung u. a. der Aspekte der Messbarkeit, der Freisetzungsmöglichkeiten aus dem Containment in umgebenden Anlagenräume sowie Robustheit des Containment-Druckentlastungspfads hinsichtlich einer Wasserstoffgefährdung einzureichen. Spezifische Festlegungen hierzu enthält (ENSI 2013e). Gemäß (ENSI 2014a) wurde dieser Termin auf Ende Juni 2014 verschoben.

In (ENSI 2015a) stellt das ENSI fest, dass alle Betreiber Unterlagen bezüglich der Gefährdung durch Wasserstoff bei schweren Unfällen eingereicht haben. Für die Anlage KKB wurde daraus die Notwendigkeit einer Erhöhung der Wasserstoffabbaukapazität im Containment durch passive,

autokatalytische Rekombinatoren (PAR) abgeleitet, vgl. auch (ENSI 2015h). Gemäß (ENSI 2016i) wurde vom KKB Anfang 2016 termingerecht Konzeptunterlagen eingereicht, die den Einsatz von zwei zusätzlichen PAR (in Ergänzung der bisherigen sieben PAR) vorsehen. Nach (ENSI 2016g) wurde der entsprechende Konzeptantrag vom ENSI freigegeben.

Gemäß (ENSI 2015a) werden für die schweizerischen Anlagen außerhalb des Containments bei auslegungsgemäßer Dichtheit des Containments und erfolgreichen Notfallschutzmaßnahmen keine zündfähigen Wasserstoffkonzentrationen erwartet. Allerdings hat ENSI in (ENSI 2015h) festgestellt, dass bei größeren, auslegungsüberschreitenden Leckagen auch höhere Wasserstoffkonzentrationen in Räumen außerhalb des Containments denkbar wären. Der Betreiber habe daher zu überprüfen, ob im Rahmen von Notfallmaßnahmen Gegenmaßnahmen zur Erhöhung der Sicherheitsmargen möglich sind. Das Kernkraftwerk Beznau führt nach (ENSI 2016g) noch Untersuchungen durch, welche anlagenspezifischen Maßnahmen zur Verringerung der Wasserstoffkonzentration außerhalb des Reaktorgebäudes getroffen werden könnten.

## 10.5. Stellungnahme

Für die Beherrschung von Störfällen sind in Druckwasserreaktoren verschiedene Sicherheitsfunktionen notwendig, für die wiederum borierte Kühlmittelvorräte erforderlich sind.

In deutschen Druckwasserreaktoren werden wesentliche Sicherheitsfunktionen wie die Sicherheitseinspeisung, die Kühlmittelergänzung und die Aufborierung durch das Sicherheitseinspeisesystem bzw. das Zusatzboriersystem erbracht. Diese greifen auf redundanzweise getrennte Vorratsbehälter (Flutbehälter) zurück und sind damit auch in den passiven Komponenten (n+2)fach redundant vorhanden. Die Aufrechterhaltung der Sperrwasserversorgung der Hauptkühlmittelpumpen ist in deutschen Druckwasserreaktoren bei Störfällen aufgrund einer Stillstandsichtung der Hauptkühlmittelpumpen keine erforderliche Sicherheitsfunktion.

Wie bereits in (Brettner et al. 2012) dargestellt sind für die Sicherheitsfunktionen der Sicherheitseinspeisung, der Containmentsprühung, der Notborierung, der Einstellung des Rezirkulationsbetriebs und der Sperrwasserversorgung der Reaktor-Hauptpumpen im Notstandfall durch das Hochdruck-Sicherheitseinspeisesystem, das Containment-Sprühsystem bzw. das Notstand-Sperrwassersystem in der Anlage KKB ebenfalls Borwasservorräte erforderlich. Diese stehen in Form eines einfach pro Block zur Verfügung stehenden Borwasser-Vorratstanks (BOTA) zur Verfügung. Bei Verlust der Versorgung eines Blocks aus dem BOTA ist grundsätzlich eine Blockstützung durch den anderen Block möglich. Hierfür ist allerdings der Aufbau von Querverbindungen zwischen den Blöcken erforderlich.

Im Rahmen des Projekts AUTANOVE wurde eine zusätzliche erdbebenfeste Sperrwasserpumpe in der Anlage KKB ergänzt, allerdings ist auf Basis der vorliegenden Unterlagen nicht erkennbar, dass für diese Sperrwasserversorgung ein vom BOTA unabhängiger borierter Kühlmittelvorrat verfügbare wäre.

Hinsichtlich der Vermaschung der Redundanzen und damit auch der Beherrschbarkeit eines passiven Einzelfehlers ist damit weiterhin der pro Block nur einmal vorhandene Borwasservorratstank (BOTA) von besonderer Relevanz. Eine Unverfügbarkeit des BOTA würde im KKB zu einem Verlust des Wasserinventars führen, das für die Sperrwasserversorgung der Reaktorhauptpumpen, die Ergänzung von Kühlmittelverlusten oder die Einstellung des Rezirkulationsbetriebs erforderlich ist. Auch wenn im Rahmen der formalen Nachweisführung kein Einzelfehler in den passiven Komponenten unterstellt werden muss, stellt die Abhängigkeit dieser

Sicherheitsfunktionen von einem pro Block nur einfach vorhandenen Vorratsbehälter einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Die Reaktor-Sicherheitskommission hat im Rahmen ihrer anlagenspezifischen Überprüfung (RSK 2011) allen deutschen Anlagen mit der Genehmigung zum Leistungsbetrieb hinsichtlich der Robustheit gegenüber zivilisatorischen Einwirkungen von außen mit Blick auf einen Flugzeugabsturz die Einhaltung des Schutzgrads 2 (Erhalt der vitalen Funktionen bei mechanischen und thermischen Einwirkungen) bei der Last-Zeit-Funktion gemäß RSK-Leitlinien bestätigt, hinsichtlich der Einhaltung des Schutzgrads 2 für eine Last-Zeit-Funktion eines mittleren Verkehrsflugzeuges gab es auf Basis generischer Untersuchungen zu Druckwasserreaktoren keine Hinweise, dass vitale Funktionen nicht erhalten bleiben. Eine Bestätigung des Schutzgrads 2 für mittlere Verkehrsflugzeuge setzt jedoch weitere Nachweise voraus. Weiterhin hat sie allen Anlagen die Einhaltung des Schutzgrades 1 mit Blick auf die Einwirkungen einer Explosionsdruckwelle (Erhalt der Vitalfunktionen, auch unter Einbeziehung möglicher Folgeschäden und möglicher einwirkungsbedingter Personalausfälle, bei Einwirkungen entsprechend den Anforderungen der BMI-Richtlinie zu Explosionsdruckwellen (BMI 1976)) bestätigt.

Angesichts der Auslegungsmerkmale der Anlage KKB gehen wir von einer gegenüber diesem Sicherheitsstatus geringeren Robustheit gegenüber zivilisatorischen Einwirkungen aus. Die stellt einen sicherheitstechnischen Nachteil der Anlage KKB dar.

Gemäß (BMUB 2016, N-21) ist für die deutschen Anlagen gefordert, dass die Einrichtungen zur gefilterten Druckentlastung so abzusichern sind, dass die Druckentlastung auch bei bzw. nach naturbedingten Bemessungs-EVA und bei Station Blackout wiederholt durchgeführt werden kann. Zudem ist die Wirksamkeit der Einrichtungen zum Wasserstoffabbau im Sicherheitsbehälter entsprechend abzusichern. Weiterhin hat die deutsche Reaktor-Sicherheitskommission gemäß (RSK 2015b) Möglichkeiten der Freisetzung von Wasserstoff aus dem Sicherheitsbehälter diskutiert und daraufhin für die deutschen Druckwasserreaktoren die Empfehlungen abgeleitet,

- hinsichtlich der Wasserstofffreisetzung im Rahmen der gefilterten Druckentlastung auf Basis repräsentativer Analysen zu untersuchen, welche Notfallmaßnahmen zur Vermeidung brennbarer Zustände in gemeinsam genutzten Abluftsystemen, wie z. B. in der Abluftkammer und im Kamin, vorgesehen werden können, oder zu zeigen, dass Wasserstoffverbrennungen nicht zu sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen führen.
- bezüglich der Wasserstofffreisetzung in Räume außerhalb des Sicherheitsbehälters im Rahmen der mitigativen Notfallmaßnahmen eine Maßnahme zu entwickeln und zu implementieren, mit der eine Umwälzung der Atmosphäre im Ringraum sowie rechtzeitig eine kontrollierte Belüftung hergestellt wird.

Aufgrund der vom ENSI eingeforderten und durch den Betreiber in Bearbeitung befindlichen Untersuchungen zur Erhöhung der Sicherheitsmargen bei einer Wasserstofffreisetzung in Räume außerhalb des Containments ergibt sich diesbezüglich kein bewertungsrelevanter Unterschied.

Entsprechend den Ausführungen des Betreibers kommt im Bereich der auslegungsüberschreitenden Störfälle mit Kernschäden der Robustheit des Sicherheitsbehälters eine hohe Bedeutung zu.

Gemäß (RSK 2015b) liegt der Auslegungsdruck deutscher DWR bei ca. 5,3 bar<sub>ü</sub>, der Versagensdruck sei im Rahmen von probabilistische Analysen als etwa doppelt so hoch wie der Auslegungsdruck bestimmt worden. Sowohl für die Anlage KKB wie für die deutschen Anlagen wurden damit grundsätzlich Sicherheitsmargen des SHBs ausgewiesen. Inwieweit diesbezüglich

sicherheitstechnisch relevante Unterschiede verbleiben, könnte nur auf Basis umfassenderer Prüfungen ermittelt werden.

Die Aufsichtsbehörde hat allerdings für die Anlage KKB darauf hingewiesen, dass es an der Stahldruckschale des Containments in der Vergangenheit zu Korrosionsschäden gekommen ist. Maßnahmen zur Reduzierung eines weiteren Korrosionsabtrags sind vom Betreiber der Anlage KKB noch durchzuführen. Auch kann die Aufsichtsbehörde die vom Betreiber vorgenommene neue Containment-Tragfähigkeitsanalyse bisher nicht vollständig nachvollziehen. Da sie den Einfluss der vorhandenen Unsicherheiten jedoch als gering einstuft, ergibt sich für uns hieraus kein bewertungsrelevanter Unterschied.



## Literaturverzeichnis

- axpo (2011a): Kernkraftwerk Beznau, Block 1 und 2; PSÜ-Auflage AÜ07, Geschäfts-Nr.14/11/003; Sicherheitstechnische Stellungnahme, Forderung 4.1-1 des ENSI vom November 2010; Einreichung eines Konzeptes "Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für Langzeitbetrieb 60 BJ" (Technische Mitteilung TM-530-MB11008). axpo kernenergie.
- axpo (2016a): Kernkraftwerk Beznau - Untersuchungen am RDB Block I. Mediengespräch vom 13. September 2016.
- axpo (2016b): Kernkraftwerk Beznau , Untersuchungen am RDB von Block 1- ein Zwischenbericht. Axpo Power AG: Informationsveranstaltung RDB, Mike Dost.
- axpo – axpo Holding AG (2015a): Kernkraftwerk Beznau Block 1. Beginn der langen Revision - Hohe Investitionen in die Sicherheit (Medienmitteilung). Online verfügbar: [http://www.axpo.com/content/dam/axpo/switzerland/medien/medienmitteilungen/2015/150312\\_MM\\_Revisionsbeginn\\_KKB1.pdf](http://www.axpo.com/content/dam/axpo/switzerland/medien/medienmitteilungen/2015/150312_MM_Revisionsbeginn_KKB1.pdf); letzter Abruf am 21.10.2016.
- axpo – axpo Kernenergie (2011b): ENSI-Verfügung vom 18.03.2011 aufgrund der Ereignisse in Fukushima: Antworten zu den Punkten 5a) bis 5c). (Rev. 0) (Technische Mitteilung TM-511-R 11018). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/kkb-antworten\\_2011-03-31.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/kkb-antworten_2011-03-31.pdf); letzter Abruf am 21.10.2016.
- axpo – axpo Kernenergie (2011c): Konzept Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für Langzeitbetrieb 60 BJ (Technische Mitteilung TM-530-MB11008).
- axpo – axpo Kernenergie (2011d): Nachweis Absicherung des Werkstoffzustandes der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre Block 1 und 2 (Technische Mitteilung TM-530-MB11071).
- axpo – axpo Kernenergie (2011e): Schlussbericht des Kernkraftwerks Beznau zum EU-Stresstest (Technische Mitteilung TM-511-R 11043).
- axpo – axpo Kernenergie (2015b): KKW Beznau: Roadmap für Wiederinbetriebnahme Block 1 erstellt - Block 2 ohne auffällige Messresultate (Medienmitteilung).
- axpo – axpo Kernenergie (2015c): Sicherheitsnachweis für RDB-Integrität von Block 2 (Technische Mitteilung TM-530-RB15056).
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (2016): Gefahregrundlagen für Extremhochwasser an Aare und Rhein (EXAR). Online verfügbar: <http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01916/13197/index.html?lang=de>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- BMI – Bundesministerium des Inneren (1976): Bekanntmachung der Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit und induzierter Schwingungen sowie durch Sicherheitsabstände (BANz Nr. 179). Online verfügbar: [http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3\\_6.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3_6.pdf?__blob=publicationFile&v=1); letzter Abruf am 01.09.2015.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): EU Stresstest - National Report of Germany. Implementation of the EU Stress Tests in Germany. Online verfügbar: [http://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU\\_Stress\\_test\\_national\\_report\\_Germany.pdf](http://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU_Stress_test_national_report_Germany.pdf); letzter Abruf am 15.09.2015.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014): Updated German Action Plan for the implementation of measures after the Fukushima reactor accident.

- Online verfügbar: <http://www.ensreg.eu/sites/default/files/Germany%20-%20National%20Action%20Plan.pdf>; letzter Abruf am 15.09.2015.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (BANz AT 30.03.2015 B2). Online verfügbar: [http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3\\_0\\_1.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.pdf?__blob=publicationFile&v=7); letzter Abruf am 01.09.2015.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Fortgeschriebener Aktionsplan zur Umsetzung von Maßnahmen nach dem Reaktorunfall in Fukushima. Online verfügbar: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Nukleare\\_Sicherheit/aktionsplan\\_fukushima\\_2016\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/aktionsplan_fukushima_2016_bf.pdf); letzter Abruf am 07.06.2017.
- Brettner et al. (2012): Analyse der Ergebnisse des EU-Stresstest der Kernkraftwerke Fessenheim und Beznau. Teil 2: Beznau. Darmstadt: Öko-Institut; PhB. Online verfügbar: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3\\_Umwelt/Kernenergie/Dokumente/Berichte/EU\\_Stresstest\\_Teil\\_2\\_Beznau.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Dokumente/Berichte/EU_Stresstest_Teil_2_Beznau.pdf); letzter Abruf am 12.10.2015.
- Bumann, U.: Auslegung von nuklearen Gebäuden gegen Flugzeugabsturz. Informationsforum Betriebssicherheit einer Oberflächenanlage. Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/dokumente/page/3/?document-category=0&orderby=date&order=DESC&posts\\_per\\_page=60](https://www.ensi.ch/de/dokumente/page/3/?document-category=0&orderby=date&order=DESC&posts_per_page=60); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI (2010a): Sicherheitstechnische Stellungnahme zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau Block 1 und Block 2 (ENSI 14/1400). Brugg: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat.
- ENSI (2011a): Alterungsüberwachung (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-B01/d). Brugg: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (1986): Auslegungskriterien für den Schutz von sicherheitsrelevanten Ausrüstungen in Kernkraftwerken gegen die Folgen von Flugzeugabsturz (Januar 1993) (Richtlinie für schweizerische Kernanlagen HSK-R-102/d). Online verfügbar: [http://static.ensi.ch/1314014379/r102\\_d.pdf](http://static.ensi.ch/1314014379/r102_d.pdf); letzter Abruf am 29.05.2017.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2009a): Anforderungen an die deterministische Störfallanalyse für Kernanlagen: Umfang, Methodik und Randbedingungen der technischen Störfallanalyse (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A01/d). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/a-001\\_d.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/a-001_d.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2009b): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05). Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2013/08/ensi-a05-richtlinie.pdf>; letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2010b): Gutachten des ENSI zum Rahmenbewilligungsgesuch der EKKB AG. Neubauprojekt Ersatzkernkraftwerk Beznau (ENSI 16/10).
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2010c): Sicherheitstechnische Stellungnahme zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau Block 1 und Block 2 (ENSI 14/1400). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/langzeitbetrieb\\_kkb.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/langzeitbetrieb_kkb.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011b): Alterungsüberwachung (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-B01/d).
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011c): EU Stress Test: Swiss National Report. ENSI review of the operator's reports.

- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011d): Kernkraftwerke sind ausreichend geschützt gegen Flugzeugabstürze. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2011/11/04/kernkraftwerke-sind-ausreichend-geschuetzt-gegen-flugzeugabstuerze/>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011e): Lessons Fukushima 11032011. Lessons Learned und Prüfpunkte aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima (ENSI-AN-7746). Online verfügbar: [http://static.ensi.ch/1323964357/fukushima\\_lessons-learned\\_web.pdf](http://static.ensi.ch/1323964357/fukushima_lessons-learned_web.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011f): Stellungnahme des ENSI zum deterministischen Nachweis des KKB zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Hochwassers (ENSI 14/1531).
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011g): Verfügung: Massnahmen aufgrund der Ereignisse in Fukushima. Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/verfugung01\\_beznau.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/verfugung01_beznau.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011h): Verfügung: Neubewertung der Sicherheitsmargen des Kernkraftwerks Beznau im Rahmen der EU-Stresstests.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011i): Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht vom 31. März 2011.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011j): Verfügung: Vorgehensvorgaben zur Überprüfung der Auslegung bezüglich Erdbeben und Überflutung.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2012a): Aktionsplan Fukushima 2012 (ENSI-AN-7844).
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2012b): EU Stress Test: Swiss National Action Plan. Follow up of the Peer Review (ENSI-AN-8124). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2013/01/ensi\\_swissap\\_eng\\_121231\\_final.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2013/01/ensi_swissap_eng_121231_final.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2012c): Fukushima-Aktionsplan: Extreme Wetterbedingungen. Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/02/ensi\\_briefe-an-kkw-zum-extremwetternachweis-beznau\\_geschwaerzt.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/02/ensi_briefe-an-kkw-zum-extremwetternachweis-beznau_geschwaerzt.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2012d): Kernkraftwerk Beznau, Block 1 und 2 Sicherheitstechnische Stellungnahme zum Langzeitbetrieb des Kernkraftwerks Beznau Sprödbruchsicherheitsnachweis der Reaktordruckbehälter 10/20JRC 0001 für 60 Betriebsjahre. Geschäfts-Nr.: 14/12/009 und 14/11/004.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2012e): Stellungnahme des ENSI zum deterministischen Nachweis des KKB zur Beherrschung des 10.000-jährlichen Erdbebens (Aktennotiz ENSI 14/1658). Online verfügbar: [http://static.ensi.ch/1341818977/kkb\\_sn-erdbebennachweis\\_final\\_geschwaerzt.pdf](http://static.ensi.ch/1341818977/kkb_sn-erdbebennachweis_final_geschwaerzt.pdf); letzter Abruf am 06.02.2017.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2012f): Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht zum EU-Stresstest (10KEX.STRESSTEST). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2012/01/ensi\\_verfuegung\\_kkb\\_geschw.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2012/01/ensi_verfuegung_kkb_geschw.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2013a): Aktionsplan Fukushima 2013 (ENSI-AN-8226).
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2013b): Beurteilung des swissnuclear-Konzepts zum externen Lager Reitnau. Stand vom 1. Dezember 2012 (Aktennotiz ENSI-AN-

- 8149). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2013/02/externes\\_lager\\_reitnau\\_ensi.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2013/02/externes_lager_reitnau_ensi.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2013c): Flugzeugabsturz: ENSI aktualisiert Untersuchungen aus dem Jahr 2003. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2013/03/05/flugzeugabsturz-ensi-aktualisiert-untersuchungen-aus-dem-jahr-2003/>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2013d): Verfügung: Analyse zum gezielten Anflug von Flugzeugen auf Kernkraftwerke. Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/10/2013\\_05\\_17\\_beznau\\_flugzeugabsturz\\_verfuegung.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/10/2013_05_17_beznau_flugzeugabsturz_verfuegung.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2013e): Verfügung: Überprüfung der gefilterten Containmentdruckentlastung und des Schutzes gegen Wasserstoffverbrennungen bei schweren Unfällen (10KEX.AP13FUKU5). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/01/ensi-verfuegung\\_wasserstoffverbrennung\\_kkb.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/01/ensi-verfuegung_wasserstoffverbrennung_kkb.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2014a): Aktionsplan Fukushima 2014 (ENSI-AN-8711).
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2014b): Berücksichtigung von Feststofftransport bei Überflutungsrechnungen (14/13/018). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/11/feststofftransport\\_brief\\_kernkraftwerk\\_beznau\\_ensi.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/11/feststofftransport_brief_kernkraftwerk_beznau_ensi.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2014c): EU Stress Test: Swiss National Action Plan. Follow up of the Peer Review (ENSI-AN-9041). Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/12/swiss-nacp-2014-final.pdf>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2014d): Implementation of post-Fukushima international recommendations. Switzerland (ENSI-AN-8801). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/ap2014\\_ensi\\_fukushima.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/07/ap2014_ensi_fukushima.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2014e): Methodik deterministischer Nachweise der Schweizer Kernkraftwerke für Erdbeben der Störfallkategorien 2 und 3 (Aktennotiz ENSI-AN-8567). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/Methodik\\_deterministische\\_Nachweise\\_KKW\\_ENSI-AN-8567.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/Methodik_deterministische_Nachweise_KKW_ENSI-AN-8567.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2014f): Stellungnahme zur Studie „Risiko Altreaktoren Schweiz“ (Aktennotiz ENSI-AN-8874). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/ensi-stellungnahme\\_studie\\_risiko\\_altreaktoren\\_schweiz\\_ensi-an-8874.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/ensi-stellungnahme_studie_risiko_altreaktoren_schweiz_ensi-an-8874.pdf); letzter Abruf am 20.10.2014.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015a): Aktionsplan Fukushima 2015 (ENSI-AN-9106). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/03/20150227\\_aktionsplanfukushima2015.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/03/20150227_aktionsplanfukushima2015.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015b): ENSI erteilt Beznau 2 Freigabe zum Wiederanfahren. Medienmitteilung. Online verfügbar: <http://www.ensi.ch/de/2015/12/23/ensi-erteilt-beznau-2-freigabe-zum-wiederanfahren/>; letzter Abruf am 12.02.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015c): ENSI Final Report: Review Approach and Comments Concerning the PEGASOS Refinement Project (PRP) and the PRP Summary Report (Aktennotiz ENSI-AN-9060). Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/wp->

content/uploads/sites/2/2016/05/PEGASOS\_Final\_Report\_PRP\_ENSI-AN-9060\_web.pdf;  
letzter Abruf am 18.10.2016.

- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015d): ENSI-Stellungnahme zur Gefährdungsanalyse extremer Wetterbedingungen am Standort Beznau (10KEX.APFUKU3). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/10/Stellungnahme\\_Extremwetter\\_KKB.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/10/Stellungnahme_Extremwetter_KKB.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015e): Kernkraftwerke müssen Analysen für Extremwetter-Gefährdung nachbessern. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2015/08/19/kernkraftwerke-muessen-analysen-fuer-extremwetter-gefaehrdung-nachbessern/>; letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015f): Kernkraftwerke reichen Unterlagen zu extremen Temperaturen ein. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2015/01/07/kernkraftwerke-reichen-unterlagen-zu-extremen-temperaturen-ein/>; letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015g): Notfallschutz in Kernanlagen (Revision 1) (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-B12/d). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/11/ENSI-B12\\_D\\_Revision\\_1.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/11/ENSI-B12_D_Revision_1.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015h): Stellungnahme zum Schlussbericht betreffend Verfügung zur Überprüfung der gefilterten Containmentdruckentlastung und des Schutzes gegen Wasserstoffverbrennungen bei schweren Unfällen (10KEX.AP13FUKU5). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/01/ensi-stellungnahme\\_wasserstoffverbrennung\\_kkb.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/01/ensi-stellungnahme_wasserstoffverbrennung_kkb.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2015i): Zusammenfassung des ENSI zur Erhöhung der Sicherheitsmargen (Aktennotiz ENSI-AN-9298). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/06/erhoehung\\_sicherheitsmargen\\_kernkraftwerke\\_ersim\\_ensi.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/06/erhoehung_sicherheitsmargen_kernkraftwerke_ersim_ensi.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016a): Auslegungsgrundsätze für in Betrieb stehende Kernkraftwerke: Sicherheitskonzepte und Auslegungsanforderungen. Erläuterungsbericht zur Richtlinie (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G02, Teil 1). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/06/ENSI-G02\\_Teil\\_1\\_D\\_Erl%C3%A4uterungsbericht.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/06/ENSI-G02_Teil_1_D_Erl%C3%A4uterungsbericht.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016b): Auslegungsgrundsätze für in Betrieb stehende Kernkraftwerke: Sicherheitskonzepte und Auslegungsanforderungen (Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G02, Teil 1). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/09/ENSI-G02\\_Teil\\_1\\_D.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/09/ENSI-G02_Teil_1_D.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016c): Beurteilung der Gefährdung durch Extremhochwasser der Aare: Hauptstudie lanciert. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2016/02/09/beurteilung-der-gefaehrdung-durch-extremhochwasser-der-aare-hauptstudie-lanciert/>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016d): ENSI-hybrid-model-hazard-figures.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016e): Kernkraftwerk Beznau: Berichte der AXPO zu Hochwasser und Verklausung. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2016/02/09/kernkraftwerk-beznau-berichte-der-axpo-zu-hochwasser-und-verklausung/>

[www.ensi.ch/de/2016/02/15/kernkraftwerk-beznau-berichte-der-axpo-zu-hochwasser-und-verklaesung/](http://www.ensi.ch/de/2016/02/15/kernkraftwerk-beznau-berichte-der-axpo-zu-hochwasser-und-verklaesung/); letzter Abruf am 20.10.2016.

- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016f): Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz. PEGASOS Refinement Project PRP (ENSI-AN-9657). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/Neubestimmung\\_Erdbebengefaehrdung\\_KKW\\_PEGASOS\\_PRP.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/Neubestimmung_Erdbebengefaehrdung_KKW_PEGASOS_PRP.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016g): Schlussbericht Aktionsplan Fukushima (ENSI-AN-9872). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/ENSI\\_Schlussbericht\\_Aktionsplan\\_Fukushima.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/ENSI_Schlussbericht_Aktionsplan_Fukushima.pdf); letzter Abruf am 17.01.2017.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016h): Schweizer Kernkraftwerke verfügen über einen guten Schutz gegen extreme Wetterbedingungen. Medienmitteilung. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/2016/10/19/schweizer-kernkraftwerke-haben-guten-schutz-gegen-extreme-wetterbedingungen/>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016i): Sicherheitstechnische Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung 2012 des Kernkraftwerks Beznau (ENSI 14/2244). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/ENSI\\_KKW\\_Beznau-PSU-final.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/ENSI_KKW_Beznau-PSU-final.pdf); letzter Abruf am 06.02.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2016j): Verfügung: Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015 für die Standorte der Schweizer Kernkraftwerke (ENSI - 10KGX.PEG). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/PEGASOS\\_ENSI\\_Verfuegung\\_KKB\\_web.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/PEGASOS_ENSI_Verfuegung_KKB_web.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat & TFK – Technisches Forum Kernkraftwerke (2014a): Frage 15: Flugzeugabsturz. Technisches Forum Kernkraftwerke. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/flugzeugabsturz/>; letzter Abruf am 21.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat & TFK – Technisches Forum Kernkraftwerke (2014b): Frage 2: Anforderungen an Sicherheit. Technisches Forum Kernkraftwerke. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/anforderungen-an-sicherheit-kkw/>; letzter Abruf am 21.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat & TFK – Technisches Forum Kernkraftwerke (2014c): Frage 8: Flugzeugabsturz. Technisches Forum Kernkraftwerke. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/flugzeugabsturz-3/>; letzter Abruf am 21.10.2016.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat & TFK – Technisches Forum Kernkraftwerke (2015): Frage 22: Flugzeugabsturz. Technisches Forum Kernkraftwerke. Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/flugzeugabsturz-4/>; letzter Abruf am 14.06.2017.
- ENSREG – European Nuclear Safety Regulators Group (2015): Rapporteurs' Report Switzerland. Ensreg National Action Plans Workshop. Online verfügbar: <http://www.ensreg.org/sites/default/files/CH%20-%20FINAL%20Rapporteurs%20Report.pdf>; letzter Abruf am 21.10.2016.
- HSK – Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (2003): Stellungnahme der HSK zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz (HSK-AN-4626). Online verfügbar: [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/fla-bericht\\_maerz03.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2011/08/fla-bericht_maerz03.pdf); letzter Abruf am 20.10.2016.

- HSK – Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (2007): Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz (Projekt PEGASOS) (HSK-AN-6252).
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2009): Master Curve Approach to Monitor Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants (IAEA-TECDOC Nr. 1631).
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2011): Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations (IAEA Safety Standards Series SSG-18). Online verfügbar: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1506\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1506_web.pdf); letzter Abruf am 12.12.2016.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2015): Integrated Regulatory Review Service (Irrs) Follow-Up Mission To Switzerland (IAEA-NS-2015/05). Online verfügbar: <https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/08/irrs-follow-up-mission-report-switzerland-2015.pdf>; letzter Abruf am 20.10.2016.
- Karrer (2012): Schreiben an das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Baden: axpo.
- KTA – Kerntechnischer Ausschuss (2011): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen (Sicherheitstechnische Regel des KTA 2201.1). Online verfügbar: [http://www.kta-gs.de/d/regeln/2200/2201\\_1\\_r\\_2011\\_11.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2200/2201_1_r_2011_11.pdf); letzter Abruf am 01.09.2015.
- KTA – Kerntechnischer Ausschuss (2012): Störfallinstrumentierung (Fassung 2012-11) (Sicherheitstechnische Regel des KTA Nr. 3502).
- KTA – Kerntechnischer Ausschuss (2013): Dokumentationsunterlage zur Regeländerung KTA 3201.2 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung (Sicherheitstechnische Regel des KTA 3201.2 Doku). Online verfügbar: [http://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3201\\_2\\_doku\\_2013\\_11.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3201_2_doku_2013_11.pdf); letzter Abruf am 10.07.2017.
- Nagra – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (2004): Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS Project). Final Report, Volumes 1-6 (PMT-SB-0001).
- ORNL (2015): Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report (R1) (ORNL/TM-2015/59349). Oak Ridge National Laboratory.
- Richner, M. (2016): Notfallkonzepte der Sicherheitsebene Vier. atw 4 (2016), S. 242–251.
- Roudén, J. et al. (2015): Towards Safe Long-Term Operation of Reactor Pressure Vessels. atw 5 (2015), S. 287–293.
- RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2011): Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan). Stellungnahme (Stellungnahme RSK 437). Online verfügbar: <http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/rsknsue20110516hp.pdf>; letzter Abruf am 01.09.2015.
- RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2012): Empfehlungen der RSK zur Robustheit der deutschen Kernkraftwerke. Empfehlung (Empfehlung RSK 450). Online verfügbar: <http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage1rsk450hp.pdf>; letzter Abruf am 05.07.2017.
- RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2013): Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung. Stellungnahme (Stellungnahme RSK 462). Online verfügbar: <http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlagersk462hp.pdf>; letzter Abruf am 12.10.2015.

- RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2015a): Anforderungen an die Brennelement-Lagerbeckenkühlung. Empfehlung (Empfehlung RSK 479). Online verfügbar: <http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage2rsk479hp.pdf>; letzter Abruf am 06.06.2017.
- RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2015b): Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter. Empfehlung (Empfehlung RSK 475). Online verfügbar: <http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage2rsk475hp.pdf>; letzter Abruf am 02.12.2015.
- RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2016): Blitze mit Parametern oberhalb der genormten Blitzstromparameter. Stellungnahme (Stellungnahme RSK 488). Online verfügbar: [http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage2rsk488hp\\_0.pdf](http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage2rsk488hp_0.pdf); letzter Abruf am 05.07.2017.
- Schwarz, G. (Vortrag am 20.04.2015, Brüssel): Swiss National Action Plan. Follow up. 2nd NAcP Review Workshop. Online verfügbar: [http://www.ensreg.eu/sites/default/files/CH%20-%20ENSREG\\_NAcP\\_3%20%283%29.pdf](http://www.ensreg.eu/sites/default/files/CH%20-%20ENSREG_NAcP_3%20%283%29.pdf); letzter Abruf am 18.10.2016.
- SED – Schweizerischer Erdbebendienst & ETH – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2016): Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland (SUIhaz2015). updated 30.08.2016.
- swissnuclear (2011): Intermediate Seismic Hazard (May 2011). Evaluation of an intermediate seismic hazard for the existing Swiss nuclear power plants (FGK-11.039.GS).
- swissnuclear (2013): Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites - PEGASOS Refinement Project. Final Report, Vol. 1-5 (Rev. 1, 20. December 2014).
- UVEK – Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (2008): Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken (Verordnung 732.114.5).
- UVEK – Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (2009): Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (1. August 2009) (Verordnung 732.112.2). Online verfügbar: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20090231/200908010000/732.112.2.pdf>; letzter Abruf am 18.10.2016.
- WENRA – Western European Nuclear Regulators' Association (2013): Recommendation in connection with flaw indications found in Belgian reactors.
- WENRA – Western European Nuclear Regulators' Association (2014): WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors. Online verfügbar: [http://www.wenra.org/media/filer\\_public/2014/09/19/wenra\\_safety\\_reference\\_level\\_for\\_existing\\_reactors\\_september\\_2014.pdf](http://www.wenra.org/media/filer_public/2014/09/19/wenra_safety_reference_level_for_existing_reactors_september_2014.pdf); letzter Abruf am 12.10.2015.
- WENRA – Western European Nuclear Regulators' Association (2015): Issue T: Natural Hazards Head Document. Guidance Document. Online verfügbar: [http://www.wenra.org/media/filer\\_public/2015/04/23/wenra-rhwg\\_t1\\_guidance\\_on\\_issue\\_t\\_head\\_document\\_2015-04-21.pdf](http://www.wenra.org/media/filer_public/2015/04/23/wenra-rhwg_t1_guidance_on_issue_t_head_document_2015-04-21.pdf); letzter Abruf am 05.07.2017.
- WENRA – Western European Nuclear Regulators' Association (2016): Issue T: Natural Hazards Guidance on Extreme Weather Conditions. Annex to the Guidance Head Document on Natural Hazards. Online verfügbar: [http://www.wenra.org/media/filer\\_public/2016/11/04/wenra\\_guidance\\_on\\_extreme\\_weather\\_conditions\\_-\\_2016-10-11.pdf](http://www.wenra.org/media/filer_public/2016/11/04/wenra_guidance_on_extreme_weather_conditions_-_2016-10-11.pdf); letzter Abruf am 05.07.2017.