



HSK 11/250

KSA 11/150

Gutachten

zum Gesuch um
unbefristete Betriebsbewilligung
und Leistungserhöhung
für das Kernkraftwerk Mühleberg

Würenlingen, Oktober 1991

5.4 AUSLEGUNG FÜR STÖRFÄLLE

Der Auslegung von Kernkraftwerken wird eine grosse Anzahl anlageinterner Störfälle und äusserer Ereignisse zugrunde gelegt (sog. Auslegungsstörfälle). Die als Folge dieser Störfälle errechnete radiologische Belastung von Personen darf dabei behördlich festgelegte Grenzwerte (Richtlinie R-11) nicht überschreiten. Dies beinhaltet auch, dass die Anlage nach dem Störfalleintritt sicher abgefahren, im unterkritischen Zustand gehalten und drucklos gefahren werden kann. Ebenso muss die Nachwärme abgeführt werden können. Bei den Auslegungsstörfällen handelt es sich zum Teil um erfahrungsgemäss zu erwartende Ereignisse, in vielen Fällen aber um unwahrscheinliche, daher postulierte Störfälle. Die Berücksichtigung dieser Ereignisse bei der Auslegung der Anlage hat einen massgebenden Einfluss auf deren Gestaltung und Ausführung und bestimmt für viele Komponenten und Systeme die zu erfüllenden Randbedingungen (z. B. Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Reaktionskräfte). Aus diesen Gründen sind in den nachfolgenden Abschnitten die wichtigsten, der Auslegung zugrunde gelegten Gefährdungsspezifikationen für äussere Ereignisse und anlageinterne Störfälle zusammengestellt.

5.4.1 Äussere Einwirkungen

5.4.1.1 Erdbeben

Bei der Gefährdung durch Erdbeben (siehe auch Kap. 2.3) wird heute zwischen dem Sicherheitserdbeben SSE (Safe Shutdown Earthquake) und dem Betriebserdbeben OBE (Operating Basis Earthquake) unterschieden. Die Anlage ist so auszulegen, dass sie das OBE ohne Schäden übersteht, währenddem beim SSE zwar Anlagenschäden entstehen können, die Freisetzung radioaktiver Stoffe nach aussen aber den in der Richtlinie R-11 festgesetzten Grenzwert für Unfälle (Ereigniskategorie 3 gemäss Richtlinie R-100) nicht überschreiten darf. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Stärke eines Sicherheitserdbebens am Standort erreicht oder überschritten wird, soll höchstens 10^{-4} /Jahr betragen. Das Betriebserdbeben OBE ist ebenfalls probabilistisch definiert als diejenige Bebenstärke, mit der während der Betriebsdauer des Kernkraftwerkes gerechnet werden muss. Entsprechend den neueren internationalen Entwicklungen wird eine mittlere Wiederkehrperiode für das OBE von 200 bis 400 Jahren angenommen.

Der ursprünglichen seismischen Auslegung des KKM lagen folgende maximale Grundbeschleunigungen der Fundamentunterkante zugrunde: 0,12 g in beliebiger horizontaler Richtung und 0,08 g in vertikaler Richtung, wobei beide Beschleunigungen gleichzeitig wirken können (g = Erdbeschleunigung).

Bei der neuen seismischen Auslegung für das SUSAN-Gebäude, die Zwischenlagererweiterung und die Etagenspektren des Reaktor Gebäudes gelten folgende maximale Grundbeschleunigungen:

- horizontal: 0,15 g beim SSE, 0,06 g beim OBE
- vertikal: 0,10 g beim SSE, 0,04 g beim OBE

Zur Darstellung des Frequenzinhalts der Erdbeben wurde das 5 %-gedämpfte HSK-Bemessungsspektrum für Feis⁹, skaliert auf die maximale Grundbeschleunigung, gewählt.

Die Freifeldanregung ist grundsätzlich am Fels anzusetzen. Im Falle Mühlebergs wurde die Eingabekote auf Höhe der Fundamentunterkante des SUSAN-Gebäudes angenommen, d. h. konservativerweise etwas tiefer als die geologische Felsoberfläche, da die Felsoberfläche verwittert ist und somit dort einen für Fels zu tiefen dynamischen Schubmodul aufweist.

5.4.1.2 Flugzeugabsturz

Zum Zeitpunkt des Baus des KKM war die Auslegung von Kernkraftwerken gegen Flugzeugabsturz (FLA) weder in der Schweiz noch im Ausland üblich. Die Nachrüstung einer bestehenden Anlage auf FLA ist nur bedingt möglich. Heute wird grundsätzlich verlangt, dass die Sicherheitsfunktionen Reaktorabschaltung, Nachwärmeabfuhr und Einschluss radioaktiver Stoffe (Isolation) durch einen FLA nicht beeinträchtigt werden. Die für die Auslegung gegen FLA zu berücksichtigenden Lasten sind in der Richtlinie R-102 festgelegt.

Die schweizerischen Behörden haben für die älteren KKW verlangt, dass die für FLA zu schützenden Sicherheitssysteme mindestens den gleichen Schutzgrad aufweisen wie das Reaktor Gebäude. Dies entspricht ungefähr einem Trümmerschutz gegen FLA (Trümmer = abstürzende Bruchstücke eines Flugzeugs). Für neu zu erstellende Gebäude, die Sicherheitssysteme enthalten, wird dementsprechend ein Trümmerschutz verlangt. Dieser ist in der Richtlinie R-102 definiert und bedeutet:

- Mindest-Betonwandstärke: 0,70 m
- Mindest-Armierung (pro Seite und Richtung): 20 cm²/m

5.4.1.3 Ueberflutung

Bei der Auslegung der Anlage wurden zwei Ueberflutungsfälle berücksichtigt (Kap. 2.4.3):

- Bruch in der Staumauer des Wohlensees mit einer Flutwellenkote +2,3 m über Terrain (468,3 m ü. M.) und Staudruck
- Bruch der Saane-Talsperren Schifflenen und Rossens mit einer damals berechneten Flutwellenkote +8,0 m über Terrain (474 m ü. M.) ohne Staudruck, da der Wasserspiegel langsam ansteigt

⁹ Erdbeben-Bemessungsspektren für schweizerische Kernanlagen, BEW-HSK (April 1984)

setzen Stoffe kann die Summe der beim Bruch einer Frischdampfleitung, einer Speisewasserleitung, einer Abgasleitung und eines Aktivkohlebehälters freigesetzten Mengen von radioaktiven Stoffen betrachtet werden.

Das Reaktorgebäude mitsamt den darin angeordneten Sicherheits- und den wichtigsten Betriebssystemen ist grundsätzlich für das SSE ausgelegt. Allerdings ist die Qualifikation einzelner Systeme und Komponenten für das SSE noch im Gang (Kap. 6.10.1). Das Zwischenlager für die radioaktiven Abfälle und das Aufbereitungsgebäude sind ebenfalls für das SSE ausgelegt.

8.2.7.3 Flugzeugabsturz

Der Schutz der sicherheitstechnischen Ausrüstungen eines Kernkraftwerks gegen die Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes erfolgt durch bauliche Massnahmen und räumliche Trennung redundanter Systeme.

Beim Bau des KKM wurde, wie damals weltweit üblich, der Flugzeugabsturz als Lastfall nicht berücksichtigt. Heute wird in der Schweiz für ältere Anlagen zumindest ein ausreichender Trümmerschutz gefordert. Dies entspricht einer Wandstärke von 0,70 m Beton (Kap. 5.4.1.2). Für die Beherrschung eines Flugzeugabsturzes sind nur das Reaktor- und das SUSAN-Gebäude von Bedeutung. Das SUSAN-Gebäude verfügt über einen ausreichenden Trümmerschutz, wobei es mit Wandstärken von 1 bis 2 m deutlich über die heutige Anforderung hinausgeht. Das Reaktorgebäude erreicht mit einer Betondicke von 0,60 m im zylindrischen Teil die geforderte Wandstärke zwar nicht. Doch sind der Reaktorkühlkreislauf, die Kernkühlsysteme und die Einrichtungen zur Isolation des Primärcontainers bei einer allfälligen Beschädigung des Reaktorgebäudes zusätzlich durch gebäudeinterne Betonwände und Decken geschützt. Die Speisewasserleitungen im Dampftunnel sind ebenfalls geschützt. Dadurch sind das sichere Abschalten und die Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlsystem gewährleistet. Die abgebrannten Brennelemente im Lagerbecken sind durch die Gebäudekuppel mit einer Wandstärke von 0,15 bis 0,30 m wenig geschützt; ein Auslaufen des Wassers ist wegen der massiven Bauweise des Beckens nicht zu erwarten. Die beiden Einlaufbauwerke für die Kühlwasserentnahme aus dem Fluss sind räumlich getrennt.

Bei einem Trümmerabsturz können zwar Ausrüstungen im Maschinenhaus beschädigt werden. Das Schadensausmass an den Ausrüstungen entspricht etwa demjenigen durch ein SSE. Allerdings kann als Folge eines eventuellen Treibstoffbrandes ein Teil der in den Aktivkohlefiltern zurückgehaltenen festen bzw. leicht flüchtigen radioaktiven Stoffe freigesetzt werden. Die grösste Menge radioaktiver Stoffe würde beim Versagen eines Aktivkohlebehälters der Abgasanlage freigesetzt.

8.2.7.4 Blitzschlag

Ein Blitzschlag mit Auswirkungen auf den Anlagebetrieb ist ein relativ häufiges Ereignis und müsste deshalb in die Kategorie der Betriebsstörungen eingereiht werden. Die für die Auslegung der elektrischen Komponenten zu berücksichtigenden, von der HSK festgelegten Auslegungsblitze haben aber extreme Kennwerte, so dass ein Auftreten solcher Blitze als seltenes Ereignis gewertet werden kann (Kap. 5.4.1.4). Die Einteilung solcher Blitze in die Kategorie Unfall ist deshalb gerechtfertigt.

Die ursprüngliche Auslegung des Blitzschutzes für das KKM erfolgte derart, dass die ganze Anlage zumindest den Vorschriften des konventionellen Blitzschutzes genügt. Dieser Blitzschutz soll grössere Schäden an Bauten und Ausrüstungen sowie eine Gefährdung des Personals innerhalb der Gebäude verhindern.

Die Ausrüstungen des SUSAN-Systems waren so auszulegen, dass ihre Funktion auch bei Auslegungsblitzen gewährleistet bleibt und damit die Kernkühlung und Nachwärmeabfuhr sichergestellt ist. Der entsprechende Nachweis steht allerdings noch aus (Kap. 6.13.3). Falls nur noch die SUSAN-Systeme verfügbar sein sollten, sind einzelne Hüllrohrschäden infolge Verletzung des CPR-Sicherheitsgrenzwerts nicht in jedem Fall auszuschliessen. Um auch dies zu verhindern, müsste z. B. der APRM-SCRAM bei 120 % Neutronenfluss sowie die Ueberwachung der Turbinen- und Bypassventile und die daraus abgeleiteten SCRAM-Signale dem SUSAN zugeordnet werden. In einem Fall mit einzelnen Hüllrohrschäden kann die allenfalls aus dem Brennstab entweichende Radioaktivität im Reaktorkühlkreislauf oder letztlich im Containment zurückgehalten werden.

8.2.8 Zusammenfassende Bewertung

Aufgrund der vorliegenden Analysen und der rund 20jährigen Betriebserfahrung ist das transiente Verhalten des KKM bei Betriebsstörungen ausreichend bekannt. Anhand der Störfallanalysen ist die Zweckmässigkeit und korrekte Auslegung der Sicherheitssysteme auch bei einer Reaktorleistung von 1097 MWI nachgewiesen. Vorausgesetzt wird dabei, dass im Normalbetrieb die in Spezifikationen und Vorschriften festgelegten betrieblichen Grenzwerte eingehalten werden. Wichtig ist vor allem die Einhaltung der thermischen Betriebsgrenzwerte für die lineare Stabileistung (LHGR), die kritische Wärmestromdichte (CPR) und die örtliche Bündelleistung (APLHGR).

Die Einhaltung dieser Betriebsgrenzwerte wird administrativ überwacht und ist Teil des Sicherheitskonzepts. Die Erfahrungen aus 20 Jahren Reaktorbetrieb zeigen, dass die Einhaltung der Betriebsgrenzen mit hoher Zuverlässigkeit erfolgt.

Die Störfallanalysen haben auch einige Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt, die zur Beherrschung bestimmter Störfälle vorteilhaft sind und damit letztlich die Anlagesicherheit verbessern. Zu erwähnen sind:

MUSA

Mühleberg Sicherheitsanalyse

Hauptbericht

Alfred Torri
Peter Bieniarz (RMA)

Dieser Bericht ist Eigentum der BKW.
Der Bericht oder Teile davon dürfen
ohne schriftliche Zustimmung der BKW
weder reproduziert noch Drittpersonen
zugänglich gemacht werden.

Erstellt im Auftrag der
BERNISCHE KRAFTWERKE AG
Bern, Schweiz
Oktober 1990

Tabelle 2-8. MUSA (Level 1) Sequenz No. 6					
Auslösendes Ereignis	Folgeausfälle	Funktionsabhängige Ausfälle	Schadenszustand	Häufigkeit (pro Jahr)	Prozent
MACRBF Militärflugzeugabsturz auf das Reaktorgebäude 1.27-7 pro Jahr	Keine	Alle Ausrüstungen im Reaktorgebäude	M1CM	1.14-7	1.76
<p>Szenario: Ein Militärflugzeug stürzt auf das Reaktorgebäude ab. Es wurde angenommen, dass der Absturzschaden und der nachfolgende Treibstoffbrand alle Ausrüstungen innerhalb des Reaktorgebäudes beschädigt und sie daher unverfügbar sind. Der Sicherheitsbehälter ist durch die armierte Betonabschirmung geschützt und bleibt intakt. Die Armaturen innerhalb des Sicherheitsbehälters schliessen. Die Speisewasserleitungen sind nichtverfügbar. Sie sind im Dampftunnel ebenfalls durch einen dicken Betonschild geschützt, können aber durch Brand beschädigt sein. Alle Einspeisemöglichkeiten sind also nichtverfügbar, und die Sicherheits-/Abblaseventile können nicht geöffnet werden. Kernschmelzen findet bei hohem Druck statt, und die Kernschmelze bleibt im Drywell ungekühlt.</p> <p>Notfallmassnahmen: Für dieses Szenario wurden keine anlageinternen Notfallmassnahmen berücksichtigt.</p> <p>Bemerkungen: Die Absturzhäufigkeit für Militärflugzeuge in der Schweiz wurde von einer Sicherheitsuntersuchung für den Forschungsreaktor DIORIT am Paul Scherrer Institut übernommen. Eine detaillierte Untersuchung des Einsturzschadensbildes wurde nicht angestellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Sicherheitsbehälter intakt bleibt wurde auf Grund der Betonabschirmung mit 0.9 abgeschätzt.</p>					
P.S.: Exponentielle Notierung in abgekürzter Form; z.B. 3.60-4 = 3.60×10^{-4} .					

11.5 KERNSCHMELZEN ALS FOLGE VON FLUGZEUGABSTURZ

Unfallsequenzen M1CMLP und M1CMHP stellen Sequenzen dar, die durch einen Flugzeugabsturz auf das Reaktorgebäude ausgelöst werden. Die Analyse dieser Unfallsequenzen zeigt einen identischen Ablauf wie bei den Sequenzen M1ABMLP und M1ABMHP, ausser dass hier während der ganzen Sequenz keine Spaltproduktrückhaltung im Reaktorgebäude stattfindet, da vorausgesetzt wird, dass dieses durch den Flugzeugabsturz zerstört ist. Daher sind die Quellterme, wie in Tabellen 11-5 und 11-6 gezeigt, wesentlich grösser.

11.6 QUELLTERME UND UNSICHERHEITEN

Die vorhergehenden Resultate zeigen sehr kleine Quellterme für die wichtigsten Unfallsequenzen. Der wesentliche Grund dafür liegt in der über die PRV offenen Abblaseleitungen in den Torus während der Freisetzung der flüchtigen Spaltprodukte aus dem Brennstoff. Sie werden, bei noch intaktem Reaktordruckgefäss, mit dem Dampf/Wasserdampf/Wassergemisch, das im aufheizenden Reaktorkern gebildet wird, in die Wasservorlage des Torus transportiert und dort absorbiert. Diese Phase des Unfallablaufes trägt also nicht zum Quellterm bei.

Die im Brennstoff verbleibenden Spaltprodukte werden nach dem Versagen des Reaktordruckgefässes mit der Schmelzmasse in den Sicherheitsbehälter transportiert und während der Kernschmelze-Beton-Wechselwirkung in den Sicherheitsbehälter freigesetzt. Die Spaltproduktfreisetzungsraten hängen dabei von der Betonerosionsrate ab. Dabei entstehen grössere Mengen von Aerosolen. Zudem werden die noch verbliebenen Anteile an CsI und CsOH in den Sicherheitsbehälter freigesetzt.

Diese Freisetzungen liefern die wichtigsten Beiträge zum Quellterm. Solange der Sicherheitsbehälter dicht ist, werden die luftgetragenen Aerosole durch Koagulation, Sedimentation, Diffusiophorese, und Thermophorese sehr schnell aus der Sicherheitsbehälteratmosphäre entfernt. Die zum Zeitpunkt des Sicherheitsbehälterversagens noch luftgetragene Aktivität steht für die Freisetzung in das Reaktorgebäude zur Verfügung. Im Reaktorgebäude sind prinzipiell dieselben natürlichen Spaltprodukt- und Aerosolabbaumechanismen wie im Sicherheitsbehälter wirksam, so dass eine weitere Reduktion der an die Umgebung freisetzbaren Mengen radioaktiver Stoffe stattfindet. Die Quellterme für jede Unfallsequenz sind in den Tabellen 11-2 bis 11-6 festgehalten. Die Quellterme für CsI und CsOH wurde separat als Quellterme für Cs und I angegeben. Ba und Sr wurden zusammengenommen, ebenso wie La und die Ce-Gruppe.

Die berechneten Quellterme sind in den Tabellen 11-2 bis 11-6 den vom Paul Scherrer Institut (PSI) in einer separaten Studie berechneten Quelltermen und den HSK-Referenzquelltermen gegenübergestellt. Die PSI-Rechnungen wurden für wesentlich andere Unfallsequenzen durchgeführt. Der HSK-Referenzquellterm bildet die Planungsgrundlage für die anlageexternen Notfallschutzmassnahmen.

Die hier berechneten Quellterme stellen Erwartungswerte dar, die mit einer 50% Wahrscheinlichkeit auftreten. Die in den Tabellen angegebenen Unsicherheiten gelten für den 5% und den 95% Vertrauenswert. Die hier berechneten Quellterme sind wesentlich tiefer als anderweitig angegebene Quellterme. Die PSI-Quellterme liegen innerhalb der Unsicherheiten der hier berechneten Quellterme.