

Mühleberg, 30. Juni 2011

BR-KL-2011/225

KKM

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Industriestrasse 19
5200 Brugg
Schweiz

ENSI ENI 07. JULI 2011



BKW[®]

**Stellungnahme zur Forderung 3.2 der Verfügung vom 1. April 2011
Ihr Zeichen SGE/FLP - 11/11/003**

BKW FMB Energie AG
Kernkraftwerk Mühleberg
CH-3203 Mühleberg

Telefon 031 754 71 11
Telefax 031 754 71 20

www.bkw-fmb.ch

Sehr geehrte Damen und Herren

Hiermit reichen wir Ihnen die Aktennotiz AN-UM-2011/062 mit dem Titel „Deterministischer Nachweis zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Hochwassers“ termingerecht ein.

Wir erachten den Nachweis, dass wir ein 10'000-jährliches Hochwasser beherrschen, damit als erbracht.

Für allfällige Fragen stehen wir Ihnen zur Verfügung.

Freundliche Grüsse

BKW FMB Energie AG
Kernkraftwerk Mühleberg



Beilage: AN-UM-2011/062



BKW BKW FMB ENERGIE AG KERNKRAFTWERK 3203 MÜHLEBERG KKM		Dokumentenart Aktennotiz	
Klassifizierung		Verfasser / Organisationsinheit [REDACTED]	
		Datum 30.06.2011	Revisionsindex
		Seite 1 von 21	Dokumenten-Nummer AN-UM-2011/062
Schlagworte			
Titel <p style="text-align: center;">Deterministischer Nachweis zur Beherrschung des 10`000-jährlichen Hochwassers</p>			
<p style="font-size: small;">Das Urheberrecht an diesem Dokument verbleibt im Besitz der BKW FMB Energie AG. Ohne ausdrückliche Genehmigung dürfen diese Schriftstücke weder kopiert, noch vervielfältigt, noch Dritten mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.</p>			
30.06.2011 [REDACTED]	30.06.2011 [REDACTED]	30.06.2011 [REDACTED]	
erstellt	geprüft	freigegeben	
Beilagen			
Verteiler ENSI, KL, AL			

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Definition des 10'000-jährlichen Hochwassers	4
2.1	Gebäude: Wasserpegel, Dichtigkeit	4
2.2	Verfügbarkeiten der Systeme, Anlageverhalten.....	6
2.2.1	Systemverfügbarkeiten.....	6
2.2.2	Betrieblicher Verlauf, Anlageverhalten	7
3	Auswirkungen des PMF bzw. HQ10'000 auf die Staudämme.....	9
3.1	Staudamm Mühleberg.....	9
3.2	Stauanlage Rossens	9
3.3	Stauanlage Schiffenen	10
4	Auswirkungen eines PMF auf die Anlage	10
4.1	Das SUSAN Notstandskühlsystem.....	11
4.1.1	Beschreibung der SUSAN-Wasserversorgung	11
4.1.2	Charakterisierung der Aare	12
4.1.3	Auswirkungen der Aare auf die Kühlwasserversorgung.....	13
4.2	Massnahmen zur Verbesserung der Verfügbarkeit des Hilfskühlwassersystems.....	16
4.3	Weitere Studien und Massnahmen.....	16
4.4	Anlageverhalten	16
4.5	Dosisberechnung	17
5	Einfluss des PMF auf das Grundwasser.....	18
6	Regenwasserüberschwemmung auf dem KKM-Gelände	18
7	Zusammenfassung.....	20

1 Einleitung

Mit dem Schreiben vom 1. April 2011 hat das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI gegenüber dem Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) eine Verfügung erlassen. Die in diesem Schreiben unter Punkt 3.2 formulierte Forderung verlangt vom KKM den deterministischen Nachweis für die Beherrschung eines 10'000-jährlichen Hochwassers am Standort des KKM. Die Forderung 3.2 lautet (Zitat):

Der deterministische Nachweis für die Beherrschung des 10'000-jährlichen Hochwassers ist basierend auf den für die Rahmenbewilligungsgesuche neu bestimmten Hochwassergefährdungen (unter Berücksichtigung der ENSI-Forderungen aus den entsprechenden Gutachten) bis zum 30. Juni 2011 zu führen. Dazu gelten folgende Randbedingungen:

- *Für den Nachweis der Beherrschung des 10'000-jährlichen Hochwassers sind nur jene Ausrüstungen und Strukturen zu kreditieren, deren Hochwasserfestigkeit für die neuen Gefährdungen nachgewiesen wurde.*
- *Es ist der Ausfall der externen Stromversorgung zu unterstellen.*
- *Es ist der deterministische Nachweis zu führen, dass eine Verstopfung oder Schädigung der Flusswasser-Einlaufbauwerke ausgeschlossen werden kann. Falls nicht gezeigt werden kann, dass die Hochwasserentlastung der vorgelagerten Stauanlagen ausreichend dimensioniert ist, darf keine Rückhaltung von Geschiebe und Schwemmgut durch diese Stauanlagen kreditiert werden. Kann der deterministische Nachweis, dass eine Verstopfung oder Schädigung der Flusswasser-Einlaufbauwerke ausgeschlossen werden kann, nicht erbracht werden, ist der Ausfall der vom Hochwasser betroffenen Kühlwasserfassungen zu unterstellen.*
- *Es ist nachzuweisen, dass die Anlage in einen sicheren Zustand überführt werden kann und dieser Zustand ohne Zuhilfenahme externer Notfallschutzmittel während mindestens 3 Tagen stabil gehalten werden kann.*
- *Interne Notfallschutzmassnahmen können nur kreditiert werden, wenn sie vorbereitet sind, genügend grosse Zeitfenster zur Durchführung vorhanden sind und die dafür erforderlichen Hilfsmittel auch nach einem 10'000-jährlichen Hochwasser zur Verfügung stehen.*
- *Die Berechnung der aus dem Störfall resultierenden Dosis erfolgt aufgrund der während des Analysezeitraums emittierten radioaktiven Stoffe und richtet sich nach Richtlinie ENSI-G14.*

Der vorliegende Bericht umfasst die in der Forderung 3.2 formulierte Nachweisführung des KKM zum Thema Hochwasser. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Definition des 10'000-jährlichen Hochwassers, die Aarewasserversorgung der (Not)Kühlsysteme, die Überführung der Anlage in einen sicheren Zustand und die Angaben über die Dosisberechnung behandelt. Bei diesen Nachweisen sind die in der Verfügungsanforderung genannten Randbedingungen berücksichtigt.

Die Auswirkungen eines 10'000-jährlichen Hochwassers bezüglich einer möglichen Verstopfung oder Schädigung der (Notstands)Kühlsysteme wurden im Auftrag des KKM von der Fa. Flussbau AG, Bern und von der Fa. AREVA NP, Erlangen durchgeführt und von weiteren externen Experten sowie von Fachspezialisten des KKM verifiziert. Zusätzlich wurden experimentelle Untersuchungen am VAW (Versuchsanstalt für Hydraulik, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich) durchgeführt. Das Verhalten der Anlage und der Systeme / Gebäude wurde KKM-intern ermittelt.

Abgrenzung: Mögliche Konsequenzen von Staudammbrüchen sollen gemäss der ENSI Verfügung vom 01.04.2011 für den 31.03.2012 analysiert werden und sind dementsprechend nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes.

2 Definition des 10'000-jährlichen Hochwassers

Das Hochwasserereignis mit 10'000-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ10'000) wurde im Rahmen der Studien bei der Erarbeitung des Rahmenbewilligungsgesuchs für das Ersatzkraftwerk Mühleberg (EKKM) für die beiden Standorte EKKM und KKM ausführlich untersucht.

Die Definition des HQ10'000 und die entsprechenden Abflüsse und Pegel sind im Sicherheitsbericht zu EKKM¹ dokumentiert und wurden im Gutachten zum Rahmenbewilligungsgesuch EKKM² vom ENSI beurteilt. Diese Beurteilung wurde in der Verfügung vom 1. April 2011 referenziert.

Die Angaben aus dem Sicherheitsbericht EKKM zur Definition des HQ10'000 können wie folgt zusammengefasst werden:

- A In einer Studie für das KKM³ wurden, basierend auf der Extremhochwasserstudie (EHW) des Kantons Bern, die Abflusskombinationen der Aare und der Saane, die eine Wiederkehrperiode von über 1'000 Jahren aufweisen, deterministisch ermittelt. Das EHW-Szenario mit dem höchsten Aareabfluss wurde gewählt, da dieses zu den höchsten Pegelständen am Standort führt, und für den Abfluss des HQ10'000 mit verschiedenen Ansätzen (Faktor 1.2 = Faustregel gemäss KTA (Kerntechnischer Ausschuss, Deutschland) oder Faktor 1.5 gemäss BFE-Richtlinie für Stauanlagen) hochgerechnet. Für die Bestimmung des Wasserpegels wurde das eindimensionale Modell WAPROF der ETH Zürich verwendet. Als Ergebnis dieser Analysen ergibt sich am Standort KKM für das HQ10'000 ein Wasserpegel von 465.86 m ü.M.
- B Des Weiteren wurde eine realitätsnahe zweidimensionale hydraulische Berechnung mit dem Rechenprogramm BASEMENT durchgeführt, in der das Aare- und das Saanetal in einem Terrainmodell abgebildet sind. Das Ergebnis am Standort KKM ist ein Wasserpegel für das HQ10'000 von 465.95 m ü.M.
- C Mit dem zweidimensionalen Modell wurde auch das PMF (probable maximum flood) deterministisch abgeleitet, und zwar auf Basis des mutmasslich grössten Niederschlags (probable maximum precipitation PMP). Das Ergebnis am Standort KKM ist ein Wasserpegel von 466.25 m ü.M.

In [2] wurde die Belastbarkeit der unter A erwähnten Ansätze angezweifelt, jedoch die Ableitung des PMF als annehmbar erachtet. Der im vorliegenden Bericht dokumentierte Nachweis bzw. die dazu durchgeführten Studien basieren deshalb konservativ auf dem PMF und sind damit abdeckend für das HQ10'000. Es wird am Standort von einem maximalen Wasserpegel beim PMF von 466.25 m ü.M.¹ auf der Grundlage von Abflüssen aus der Aare resp. Saane von 1'166 resp. 2'110 m³/s ausgegangen. Die in den Studien und in dem vorliegenden Bericht erwähnten lokalen Wasserpegel entsprechen stets dieser Grundlage.

2.1 Gebäude: Wasserpegel, Dichtigkeit

Im Rahmen der hydrologischen Berechnungen zur Ermittlung des HQ10'000- bzw. PMF-Wasserpegels auf dem KKM-Areal wurde das digitale Terrainmodell (DTM) verwendet: Die entsprechenden Pegel bei den einzelnen Gebäuden bewegen sich im Zentimeterbereich des Standortpegels (innerhalb der Genauigkeit der Modellierung).

Die Strassen und Plätze im KKM-Areal liegen zwischen 465.70 und 466.00 m ü.M. Die Erdgeschosshöhe der Gebäude liegt überall auf 466.00 m ü.M. (= Kraftwerksnull). Das Kraftwerksgelände wird somit bei einem PMF mit 0.25 bis 0.55 m überflutet. Bei diesen Überflutungshöhen und dem im KKM-Areal herrschenden Gefälle im Promillebereich treten nur geringe Fliessgeschwindigkeiten und keine Erosion auf. Das Areal kann generell mit geeigneten Massnahmen (Stiefel, Stege) begangen werden.

¹ Der durchschnittliche Wasserpegel am Standort ist ca. 461 m ü.M.

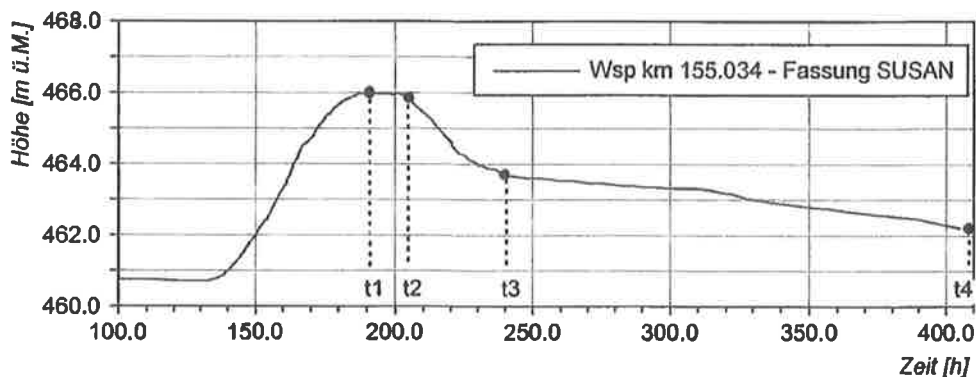
Die für den sicheren Anlagebetrieb wichtigen Gebäude behalten ihre Integrität. Das Reaktorgebäude, das SUSAN-Notstandsgebäude und das Zwischenlagergebäude sind für eine äussere Überflutung bis 472.00 m ü.M. (6.00 m über Kraftwerksnull) ausgelegt und werden deshalb nicht beeinträchtigt.

Bei den für die Störfallbeherrschung nicht relevanten Gebäuden kann ab 466.00 m ü.M. Wasser über Türen, Tore und undichte Fugen ins Gebäudeinnere strömen. Bei geschlossenen Türen bzw. bei in diesem Fall rund um die Zugänge ergriffenen Hochwasserschutzmassnahmen, wie z.B. Sandsackwällenⁱⁱ, ist aber die einströmende Wassermenge klein. Die Bauteile der Fassaden und Abschlüsse halten den bei den anstehenden Wasserhöhen geringen Wasserdrücken stand. Wo notwendig, werden mobile Sumpfpumpen zum Abführen von Leckwasser installiert. Die Versorgung der Sumpfpumpen wird über ein mobiles Notstromaggregat sichergestellt.

Die einströmenden Wassermengen über die Gebäudefassaden werden vom KKM-Ressort Bautechnik wie folgt abgeschätzt (Liter pro Laufmeter Fassade und Sekunde):

- Betonwand nicht abgedichtet: 0.01
- Betonelemente mit Fugen: 0.1
- Türen, Tore: 1

Der Verlauf des PMF (siehe untere Abbildung) zeigt, dass der Wasserpegel maximal 24 h über 466.00 m ü.M. liegt. Damit lässt sich errechnen, dass das einströmende Wasser während dieser Zeitspanne in den Untergeschossen zu Wasserständen von nur 1 bis 5 cm Höhe führt. In den Erdgeschossen ist nur mit Bildung von Wasserpfützen von den Fassaden bis zu den Deckenöffnungen zu rechnen. Die Funktion der Einrichtungen in den Untergeschossen, die auf Sockeln stehen, und der Einrichtungen in den Erdgeschossen im Allgemeinen bleibt erhalten.



Verlauf des berechneten Wasserspiegels bei der SUSAN-Wasserfassung beim PMF (aus [13])

In das Maschinenhaus und das Betriebsgebäude ist ein Wassereintritt über den Kabelkanal vom Wasserkraftwerk bis zum KKM nicht möglich, weil der Kabelkanal vor dem Maschinenhaus abgedichtet wird⁴.

Ein PMF hat somit generell keine signifikanten Auswirkungen auf die Gebäude des KKM. Eine Ausnahme bildet das Pumpenhaus. Durch die vorhandenen Einstiegöffnungen und Abdeckungen über dem Zulaufraum, der mit der Aare verbunden ist, würden ab einem Aarewasserpegel von 466.00 m ü.M. grössere Mengen Wasser in den Innenraum des Pumpenhauses fliessen. Der Pumpenkeller und

ⁱⁱ Die Bewehrungen sind so ausgeführt, dass die Funktion der Fluchtwege erhalten bleibt

die Pumpen im Pumpenhaus sind jedoch durch eine mobile Hochwasserschutzwand geschützt (siehe Kap. 4.2). Ausserdem stehen feste und mobile Pumpen zur Verfügung, die - ab einem Pegelstand von ca. 463 m ü.M. - im Pumpenhaus angeschlossen bzw. in Betrieb genommen werden, um das ins Pumpenhaus eingedrungene Wasser zu drainieren (siehe Kap. 2.2.2).

2.2 Verfügbarkeiten der Systeme, Anlageverhalten

2.2.1 Systemverfügbarkeiten

Unter der ENSI-Vorgabe, dass die externe Stromversorgung ausfällt, stehen folgende Anspeisungen nicht zur Verfügung:

- 220 kV A1 / Blockschiene D
- 220 kV A1 / Blockschiene F
- 50 kV Anfahrschiene E
- Hydroeinspeisung C1 und C2^{III}
- Externe Versorgung Grundwasserbrunnen REWAG

Die Verfügbarkeit von Systemen ist von der Verfügbarkeit der Stromversorgung, der Überflutungshöhe und der Verfügbarkeit der notwendigen Hilfssysteme abhängig. Im Fall HQ10'000 bzw. PMF stehen folgende Systeme zur Verfügung:

- Zur Nachwärmeabfuhr: Hilfskühlwasser (HiKW) und STCS (Abfahr- und Toruskühlsystem)
- Notstandssysteme: CWS (Cooling Water System, Teil des SUSAN-Systems - äusserer Kühlkreislauf, Einlaufbauwerk SUSAN) und TCS (Notstand-Toruskühlsystem)
- Zur Einspeisung in den RDB (Reaktordruckbehälter): Speisewasser / Kondensatsystem in der Anfangsphase, RCIC (Reactor Core Isolation Cooling) entsprechend RDB-Druck, CRD (Control Rod Drive), CS (Core Spray) und ALPS (Alternate Low Pressure Spray)
- Zum Druckabbau im RDB: Frischdampfsystem / Kondensation, SRV (Safety Relief Valve) und PRV (Pressure Relief Valve)
- Zur Notstromversorgung: Diesel 90 Strang 1+2 und Diesel 190/290 Strang 3+4
- Für die Informations- und Überwachungssysteme: Instrumentierung MCR (Main Control Room), Instrumentierung SCR (SUSAN-Kommandoraum), PVS (Prozessvisualisierungssystem), Raumstrahlungs- und Aerosolüberwachung und Aktivitätsüberwachung Kaminabluft

Bezüglich des Hochreservoirs wird, nach dem Verlust des REWAG-Grundwasserbrunnens (Ausfall der Stromversorgung, Überflutung des Brunnens), der Wasserverbrauch durch Nachfüllen mittels Tankfahrzeug kompensiert. In dieser Situation ist der Verbrauch sehr gering, da die grossen Verbraucher wie z. B. das Zusatzwassersystem nicht mehr in Betrieb sind. Die Befüllung des Hochreservoirs wurde bereits in der Vergangenheit durchgeführt und hat sich bewährt.

^{III} Die Hydroeinspeisungen sind gekoppelt mit dem 50 kV - Netz

2.2.2 Betrieblicher Verlauf, Anlageverhalten

Bei Hochwasser (sowie bei Unwetter, Erdbeben und Lawinen) sind die Fachstellen des Bundes für die offiziellen Warnungen der lokalen Behörden verantwortlich. Das KKM erhält den Hinweis auf ein bevorstehendes Hochwasser vom Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern, welches insbesondere bei einer erhöhten Aarewassermenge von 340 m³/s in Thun oder 400 m³/s in Bern Schönau eine Alarmierung auslöst. Bei steigenden Pegelständen bzw. in ausserordentlichen Lagen werden Mitteilungen vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) bzw. von der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) herausgegeben.

Im KKM werden durch diese Alarmierung Notfallmassnahmen ausgelöst. Danach erfolgt der Betrieb der Anlage nach folgenden Dokumenten:

- 1) Betriebsentscheidungshilfe Hochwasserereignisse⁵
- 2) Betriebsnotfallanweisung „Überflutung“⁶
- 3) Checkliste Gebäudeschutz bei Hochwasser [4]
- 4) Grundlagen Notfallordner (GNO)
- 5) Allgemeine Notfallanweisungen (ANA)
- 6) Gesamtanlagenfahrvorschrift (GAFV)

Entsprechend dem Verlauf des Notfalles können weitere Stör- und Notfalldokumente zum Einsatz kommen.

Gemäss [5] wird der Ereignisstab / Notfallstab des KKM aufgeboten. Zusätzlich wird die KKM-Feuerwehr sowie das notwendige Unterstützungspersonal mobilisiert. Diese Entscheidungshilfe enthält mehrere Massnahmen, die in Abhängigkeit vom Wasserpegel zu ergreifen sind, wie z.B.:

- Pegelstand vor Pumpenhaus überwachen
- Überprüfen des Kabelkanals KKM-Unterstation Ost auf Wassereintritt
- Mobile Sumpfpumpen im Pumpenhaus / Kabelkanal installieren
- Grobrechen überwachen
- Sand / Sandsäcke bereitstellen bzw. Gebäudeeingänge (gemäss Prioritätenliste) damit schützen
- Personelle Überwachung der Gebäudeeingänge und der kontrollierten Zone
- Sicherstellen Verkehrsverbindungen im Areal (z. B. Stege aufbauen)

Der betriebliche Ablauf im Falle eines HQ10'000 / PMF sieht generell wie folgt aus:

Zustand / Massnahme	Pegelstand [m ü.M.]	Zeitlicher Ablauf [h]
Erste Massnahmen gemäss [5] durch Betriebsschicht	463.00	- 12
Freischaltung Grundwasserbrunnen REWAG durch Betriebschicht	463.55	- 8
Aufgebot Ereignisstab / Notfallstab + KKM Feuerwehr, Unterstützungspersonal (Überwachung, Betrieb)	≥ 464.00	- 4
Weiterer Ablauf gemäss Betriebs-Notfallanweisung „Überflutung“ [6]		
Bildung Notfallstab Aufträge an die Feuerwehr, Erstellen Gebäudeschutz und Bereitstellen Feuerweerpumpe für eventuelle SUSAN-Einspeisung (siehe Kap.4.1.1) gem. Checkliste Gebäudeschutz bei Hochwasser [4]	≥ 464.12	- 3
Reaktorabschaltung / Hand-Scram - Abkühlen des Reaktors in Hauptwärmesenke (55 °C/h) Niveauhaltung durch Speisewassersystem oder Sicherheitseinspeisesysteme (Entscheid PI / Notfalleiter) → Zu diesem Zeitpunkt sind immer noch alle Systeme verfügbar	≥ 464.50	0
Anlagezustand: - Abkühlen des Reaktors in Hauptwärmesenke abgeschlossen - Hauptkühlwasser ausser Betrieb - Hauptkühlwassereinlaufbauwerk verriegeln in Stellung OFFEN (gemäss [7]) - Siebbandmaschinen in Langsamgang mit Abspritzung auf Dauerbetrieb (gemäss [6]) - Reaktor < 160 °C Kühlbetrieb mit STCS / HiKW - Niveauhaltung durch Kondensatpumpen	≥ 465.00	4
Anlagezustand: - Reaktor < 100 °C Kühlbetrieb mit STCS / HiKW - Niveauhaltung durch Kondensatpumpen	≥ 465.40	7
Fluthöhe erreicht Areal Kote	466.00	13
Max. Fluthöhe PMF erreicht Anlagezustand: - Reaktor ca. 50 °C Kühlbetrieb mit STCS / HiKW - Niveauhaltung durch CRD - Notstrombetrieb Strang 1+2 - SUSAN mit Notstrombetrieb standby - BEB Kühlsystem in Betrieb mit ZKW-RG / HiKW - Niveauhaltung Brennelementbecken falls notwendig über STCS → Zu diesem Zeitpunkt fällt die gesamte ext. Stromversorgung aus (= Vorgabe für die Störfallanalyse)	466.25	15

Aufrechterhaltung dieses Betriebszustandes ab 466.25 m ü.M.: In diesem Zustand hängt die Dauer der Notstromverfügbarkeit von der Dieselbelastung, dem verfügbaren Kraftstoffvorrat resp. der Nachfüllmöglichkeit ab. Der Notstrombetrieb mit Diesel ist somit wie folgt limitiert:

Diesel 090 Strang 1+2: Grundbelastung + Einzelaggregate gem. Betriebszustand 980 kW
Dieselbelastung ca. 75 %
Dieselvorrat 6'970 kg / Verbrauch 0.21 kg/kW/h
Laufzeit ohne Nachfüllung ca. 33 h

Diesel 190/290 Strang 3+4: Grundbelastung + CWS / ICWS / ALPS 300 kW
Dieselbelastung ca. 50 %
Dieselvorrat 20'500 kg / Verbrauch 0.190 kg/kW/h
Laufzeit ohne Nachfüllung ca. 350 h

Bei einer Überflutungshöhe von 466.25 m ü.M. kann das Areal mit einem Tankfahrzeug zum Nachbetanken der Diesel befahren werden. Ein solches Tankfahrzeug ist im KKM vor Ort und enthält ca. 11'000 l Diesel. Das Nachbetanken ist ohne weiteres möglich, da die Einfüllstutzen über 467 m ü.M. liegen.

3 Auswirkungen des PMF bzw. HQ10'000 auf die Staudämme

3.1 Staudamm Mühleberg

Bei einem Aareabfluss von 1'166 m³/s (PMF, gemäss Kap. 2) und unter der konservativen Annahme, dass alle Maschinen ausfallen, erreicht die Stauhöhe am Staudamm Mühleberg gemäss den hydrologischen Berechnungen eine Maximalkote von 482.42 m ü.M., d. h. die Mauerkrone (481.94 m ü.M.) wird um 48 cm überströmt. Die Gefährdung der Bauabschnitte der Stauanlage wurde für diese Überstauhöhe mit folgenden Ergebnissen nachgerechnet⁸:

- Die Kipp- und Gleitsicherheit ist genügend, so dass die Stabilität des Dammes nicht gefährdet ist. Der Lastfall „Überstaukote 482.42 m ü.M.“ ist im Vergleich zum Lastfall Erdbeben nicht massgebend.
- Beim Wehrteil strömt zusätzlich zum Überfall über die Klappen Wasser über die Wehrpfeiler. Die weiter nach oben führenden Brückenpfeiler werden nur geringfügig belastet und die Verhältnisse weichen nicht wesentlich vom normalen Hochwasserfall ab.
- Im Bereich des Maschinenhauses strömt Wasser durch Öffnungen ins Gebäude und verursacht Schäden an den Einrichtungen. Das Wasser tritt durch die grossen unterwasserseitigen Fenster, die herausgedrückt werden, wieder aus dem Gebäude aus und fällt auf den unterwasserseitigen Vorplatz des Maschinenhauses. Von dort fliesst es in den Auslaufbereich der Turbinen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei einem PMF die Anlagen im Maschinenhaus des Wasserkraftwerkes Mühleberg zwar beschädigt werden, die Stauanlage insgesamt jedoch dem Ereignis Stand hält.

3.2 Stauanlage Rossens

Es wurde nachgewiesen⁹, dass die Stauanlage Rossens dank ihrer Ablassorgane in der Lage ist, ein Extrem-Hochwasserereignis aufzunehmen und abzuleiten.

Das angenommene Extrem-Hochwasserereignis entspricht dem 1.5-fachen eines 1'000-jährlichen Hochwassers ($Q_{max} = 1'200 \text{ m}^3/\text{s} = 1.5 \times Q_{1'000}$). Diese empirische Berechnung entspricht dem

definierten Sicherheitshochwasser für mittlere und grosse Stauanlagen¹⁰. Das so berechnete Sicherheitshochwasser ist einem 10'000-jährlichen Hochwasser (HQ10'000) gleichzusetzen.

Die maximale Wasserkote vor der Staumauer beim Extrem-Hochwasserereignis beträgt 678.00 m ü.M., der damit verbundene maximale Abfluss mittels Ablassorgane 909 m³/s. Die Höhe der Staumauer-Krone beträgt 679.00 m ü.M. Die Staumauer wird deshalb nicht überströmt.

Die Stauanlage Rossens kann also ein HQ10'000 ohne Konsequenzen bewältigen.

3.3 Stauanlage Schiffenen

Die Abflusskapazität der Stauanlage Schiffenen beim Bemessungshochwasser-Ereignis wurde nachgewiesen¹¹. Die angenommenen Szenarien bzw. das zugrunde liegende „Bemessungshochwasser“ (HQ1'000 gemäss [10]) wurde mit zwei Szenarien berechnet:

- Vor dem Bau der Stauanlage Rossens, d.h. vor 1948: HQ1'000 = 1'070 m³/s
- Nach dem Bau der Stauanlage Rossens, d.h. ab 1949: HQ1'000 = 781 m³/s

Für beide Szenarien wurde nachgewiesen, dass die Stauanlage Schiffenen dank ihrer Ablassorgane in der Lage ist, das Bemessungshochwasser HQ1'000 aufzunehmen und abzuleiten.

Bei Multiplikation des 1'000-jährlichen Hochwassers nach dem Bau der Stauanlage Rossens (781 m³/s) mit einem Faktor 1.5 resultiert gemäss [10] ein Sicherheitshochwasser (gleichbedeutend mit HQ10'000) von 1'172 m³/s. In [11] wurde nachgewiesen, dass die Stauanlage Schiffenen ein Hochwasser von bis zu 1'220 m³/s aufnehmen und ableiten kann.

Jüngere Berechnungen der *Groupe-E* (= Betreiberin der Stauanlage Schiffenen) zeigen, dass sogar ein maximaler Hochwasser-Abfluss von 1'500 m³/s durch die Ablassorgane und ohne Überströmung der Staumauer bewältigt werden kann.

Daraus folgt, dass die Stauanlage Schiffenen ein HQ10'000 ohne Konsequenzen bewältigen kann.

4 Auswirkungen eines PMF auf die Anlage

Die bis anhin durchgeführten Analysen zur Beherrschung eines Hochwasserereignisses - unter der Annahme, dass die externe Stromversorgung ausfällt - stützten sich auf die Nutzung des SUSAN-Systems ab, weil in diesen Analysen postuliert wurde, dass das Hilfskühlwasser bei einem Pegel von 466.0 m ü.M. ausfällt. Aufgrund des zweisträngigen Aufbaus des SUSAN-Systems wird ein Einzelfehler in einer beliebigen, aktiven Komponente beherrscht.

Für die Verfügbarkeit des SUSAN-Systems ist eine sichere Wasserversorgung dieses Systems notwendig. Das SUSAN-Einlaufbauwerk bezieht Aarewasser aus dem Hauptkühlwasserauslaufbauwerk. Bei stehendem Haupt- und Hilfskühlwasser wird kein Aarewasser in das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk gefördert, so dass das SUSAN-System Wasser aus der Aare über das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk ansaugt. Überdies kann auch Wasser über das Hauptkühlwassersystem aus dem Hauptkühlwassereinlaufbauwerk angesaugt werden (siehe Kap. 4.1.3.2). Eine Verstopfung des Hauptkühlwasserauslaufbauwerks sollte möglichst vermieden werden. Vergangene Hochwasserereignisse wie z.B. jenes im Jahr 2007 haben erhöhte Erosionseffekte gezeigt; bei einem Extremhochwasser könnte dieser Effekt zu einer Verstopfung des SUSAN-Einlaufbauwerks führen. Um diesen Sachverhalt in der nötigen Tiefe abzuklären, hat das KKM detaillierte Studien veranlasst. Bei diesen Untersuchungen wurde die Auswirkung von Schwebstoffen / Feinsedimenten, Geschieben und organischen Materialien berücksichtigt.

Mit diesen Studien konnte in einem ersten Schritt zwar gezeigt werden, dass eine Verstopfung des SUSAN-Einlaufbauwerks für das PMF mit gleichzeitig hohen Abflüssen in der Aare und der Saane

ausgeschlossen werden kann. Jedoch wurde erkannt, dass bei anderen Szenarien als dem PMF (mit tieferen Abflüssen, aber mit grösseren Unterschieden zwischen den Abflüssen in Aare und Saane) Schleppspannungen im Wasser auftreten können, die zu grösseren Geschiebemenen führen und somit eine Verstopfung des Einlaufbauwerkes SUSAN verursachen könnten. Um diesen Befund weiter zu untersuchen wurden zusätzliche Studien sowie Modellversuche durchgeführt. Erste Ergebnisse und deren Bewertung werden in Kap. 4.3 behandelt.

Im Rahmen dieser zusätzlichen Untersuchungen wurden neue Erkenntnisse über die Belastung des Hauptkühlwasserauslaufbauwerkes durch die Aare bei einem PMF und stillstehendem Hilfskühlwassersystem gewonnen. Diese zeigen nun, im Gegensatz zu den bisherigen Analysen, dass ein ausreichender, offener Querschnitt zur Ansaugung von Aarewasser durch SUSAN nicht garantiert werden kann¹². Deshalb wird die Ereignisbeherrschung um die Nutzung des Hilfskühlwassersystems ergänzt, womit die Anlage sicher abgefahren und im kalten Zustand gehalten werden kann. Sollte das Hilfskühlwasser ebenfalls nicht verfügbar sein, kann eine Aarewasserversorgung des CWS über das Haupteinlaufbauwerk und das Hauptkühlwassersystem erfolgen.

Damit das Hilfskühlwasser auch bei einem PMF - Pegel von 466.25 m ü.M. noch zur Verfügung steht, hat das KKM kurzfristig Massnahmen ergriffen, die im Kap. 4.2 beschrieben sind. Die Aarewasserversorgung des CWS über das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk und das Hauptkühlwassersystem wurde rechnerisch geprüft.

4.1 Das SUSAN Notstandskühlsystem

4.1.1 Beschreibung der SUSAN-Wasserversorgung

Das SUSAN-Notstandsgebäude versorgt sich mit Aarewasser durch den Betrieb der zwei redundanten CWS-Pumpen. Sie saugen Aarewasser aus dem Hauptkühlwasserauslaufbauwerk an (die folgenden Bilder zeigen einen Überblick über die Wasserein- und auslaufbauwerke).



Anlagenübersicht mit Wasserfluss im Normalbetrieb



Anlagenübersicht mit Wasserfluss im SUSAN-Notstandsbetrieb

Die Ansaugstrecke zwischen CWS-Pumpen und der Ansaugstelle im Hauptkühlwasserauslaufbauwerk ist grundsätzlich offen. Von dieser Ansaugstelle wird Aarewasser angesaugt, unabhängig davon, ob das Hilfskühlwassersystem in Betrieb ist. In erster Linie im Sinne von Defence-In-Depth ist das Hilfskühlwasser in Betrieb. Erst wenn das Hilfskühlwasser ausfällt, saugt in zweiter Linie - im Sinne von Defence-In-Depth - das CWS Wasser über das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk aus der Aare an. Sollte eine Aarewasserversorgung auch auf diesem Wege nicht möglich sein, erfolgt als dritte Linie im Sinne von Defence-In-Depth die Ansaugung von Aarewasser aus dem Hauptkühlwassereinlaufbauwerk^{iv}. Die Bespeisung kann ab einem Aarepegel von 462.8 m sichergestellt werden. Zusätzlich besteht ab einem Pegel von ca. 465 m ü.M. die Möglichkeit das SUSAN-Einlaufbauwerk über die Öffnungen in der Decke des Hauptkühlwasserauslaufbauwerks (Objektschutzöffnungen) mit Aarewasser zu versorgen. Dies gewährleistet die CWS-Wasserversorgung auch wenn kein Aarewasser über Hauptkühlwasserein- und -auslauf bezogen werden kann. Das gleichzeitige Verstopfen des Hauptkühlwasserein- und auslaufbauwerks kann nach heutigem Wissensstand ausgeschlossen werden. Sofern eine ausreichende Überdeckung der Öffnungen durch das Aarehochwasser gewährleistet ist, wird keine Bespeisung durch Pumpen notwendig. Nur bei niedrigeren Aare-Pegelständen, bei denen die Öffnungen in der Decke des Hauptkühlwasserauslaufbauwerks nicht überdeckt sind, erfolgt eine Bespeisung dieser Öffnungen durch vorhandene mobile Pumpen mit Wasser aus der Aare.

Das Hilfskühlwassersystem wird von einem Notstromdiesel mit Notstrom versorgt. Beim Einzelfehler im Notstromdiesel des HiKW muss sich das CWS selbst mit Aarewasser über das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk und das Hauptkühlwassersystem versorgen. Die SUSAN-Notstromversorgung ist zweifach aufgebaut und daher einzelfehlerfest.

4.1.2 Charakterisierung der Aare

Der zeitliche Verlauf des Aare-Pegels bei einem PMF und die zeitliche Abflussmenge auf Höhe des KKM sowie der Einfluss auf die Bauwerke durch von der Aare mitgeführtes Geschiebe, Sedimente, Treibgut und Schwebstoffe wurden von externen Experten untersucht¹³. Nach Erreichen des Maxi-

^{iv} Es wird vorsorglich in Stellung OFFEN verriegelt (siehe Kap. 2.2.2)

malpegels von 466.25 m ü.M. sinkt die Abflussmenge unterhalb der Saanemündung von 2'950 m³/s auf ca. 500 m³/s, siehe [13].

Im Wohlensee werden Feststoffe mobilisiert, wobei sich gröbere Fraktionen wieder im Wohlensee ablagern. Weitere Quellen für mobilisierte Feststoffe sind die Ränder des Wohlensee-Wehrs, an denen Feststoffe durch über das Wehr abfliessendes Wasser erodiert werden sowie der Abschnitt der Aare zwischen Wehr und Niederruntigen, in welchem durch die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit Kies mobilisiert wird (siehe [13]). Auf Höhe Niederruntigen mobilisierter Kies wird jedoch zwischen Niederruntigen und dem KKM abgelagert, so dass kein oder nur sehr wenig Geschiebe und Kies die Einlaufbauwerke erreicht.

Ebenfalls mobilisiert werden Feinsedimente, z.B. Silt oder Sand, bis zu einer Korngrösse von ca. 2 mm. Feinsedimente mit grösseren Korngrössen werden sohlennah in höherer Konzentration und mit langsamer Geschwindigkeit transportiert. Kleine Korngrössen treten zwischen Wasseroberfläche und Sohle mit geringeren Konzentrationsunterschieden auf und bewegen sich schneller mit der Strömung (siehe [13]). Feinsedimente können in Konzentrationen bis ca. 0.58 g/l über den Fliessquerschnitt der Aare und bis ca. 1.0 g/l sohlennah auftreten.

Unter organischen Materialien werden z.B. Schlick, Wasserpflanzen oder Sträucher am Aareufer verstanden. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Wohlensee wird davon ausgegangen, dass nur wenige Pflanzen abgetragen werden. Denkbar ist die Mobilisierung von Pflanzen durch Umlagerung von Sedimentbänken im oberen Bereich des Wohlensees. Dort mobilisierte Pflanzen erreichen das KKM erst nach >125 h. Grundsätzlich liegen mobilisierte Pflanzen, die über das Wehr gespült werden, gleichmässig über den Flussquerschnitt verteilt vor. Ufergehölz kann am unteren Aareufer mobilisiert werden und schwimmt an der Oberfläche. Schlick wird am Fuss des Wehres während kurzer Zeit erodiert. Er liegt in gleichmässiger Konzentration über den gesamten Aarequerschnitt vor.

4.1.3 Auswirkungen der Aare auf die Kühlwasserversorgung

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Aare bei einem PMF die Kühlwasserversorgung beeinflusst. Dabei werden die beiden Fälle (a) mit laufendem und (b) mit ausgefallenem Hilfskühlwassersystem entsprechend Kap. 4.1.1 unterschieden. Die Aarewasserversorgung des SUSAN-Systems erfolgt entweder über das Hauptkühlwasserein- oder auslaufbauwerk.

4.1.3.1 Laufendes Hilfskühlwassersystem

Das Hilfskühlwasser saugt über das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk Flusswasser an und gibt es über das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk an die Aare zurück. Das Hilfskühlwassersystem entnimmt der Aare einen Volumenstrom, der ca. 3% des Volumenstroms entspricht, der im Leistungsbetrieb durch das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk angesaugt wird. Entsprechend niedrig sind die Strömungsgeschwindigkeiten im Hauptkühlwassereinlaufbauwerk bei Betrieb des Hilfskühlwassersystems.

Für diesen Fall wurden die Systeme des Hauptkühlwassereinlaufs, des Hilfskühlwassers und des SUSAN durch die Firma AREVA NP hinsichtlich ihrer Funktion bei einem PMF bewertet¹⁴, auf Basis der in [13] dokumentierten Studien. Die Ergebnisse dieser Prüfungen werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Geschiebe, insbesondere Kies, erreicht das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk nicht oder nur in sehr geringem Masse, so dass es den Einlaufquerschnitt wenig verengt und geringe erhöhte Druckverluste beim Ansaugen von Aarewasser verursacht werden.

Gehölz, das durch das PMF mobilisiert wird, treibt an der Oberfläche und sammelt sich oberhalb des Rechens. Eine Verkleinerung des Ansaugquerschnitts des Hauptkühlwassereinlaufbauwerks ist damit

sehr unwahrscheinlich, so dass nicht mit erhöhten Druckverlusten beim Ansaugen von Aarewasser zu rechnen ist.

Im Aarewasser gleichmässig enthaltene Wasserpflanzen werden über den gesamten Einlaufquerschnitt angesogen. Sie stammen von ufernahen Bereichen unterhalb des Wehrs, weshalb ihre Menge begrenzt ist. In der Vergangenheit haben Wasserpflanzen bei Hochwasser im Leistungsbetrieb keine nennenswerten Probleme verursacht, bei einem PMF ist jedoch mit dem Anschwemmen einer grösseren Menge Wasserpflanzen zu rechnen. Aufgrund des viel geringeren Volumenstroms, der durch das Hilfskühlwassersystem allein angesaugt wird (< 3% im Vergleich zum Volumenstrom bei Leistungsbetrieb) ist das Offenbleiben eines entsprechend kleinen Querschnitts des Einlaufs ausreichend, so dass mit keiner unzulässigen Erhöhung des Druckverlusts im Hauptkühlwassereinlaufbauwerk zu rechnen ist. Kleine organische Feststoffe passieren den Rechen und werden vom Siebrechen aufgenommen. Alle drei Siebrechenanlagen sind ebenfalls mit Notstrom versorgt, so dass von der Funktionsfähigkeit dieser Siebrechenanlage auszugehen ist.

Feinsedimente mit einer Korngrösse < 1.5 mm, bestehend aus Silten, Sanden oder Schlick, werden vom Hilfskühlwassersystem angesaugt und passieren den Rechen. Sie werden weiter in das Kühlswassersystem gesaugt. Entsprechend ihrer Korngrösse und Strömungsgeschwindigkeit ist damit zu rechnen, dass sich Teile der Feinsedimente in Systembereichen mit geringer Strömungsgeschwindigkeit absetzen. In Totwassergebieten wie z.B. Ecken, beeinträchtigen sie die Systemfunktion nicht. In durchströmten Querschnitten führt ein Absetzen von Feinsedimenten zu einer Querschnittsverengung, die wiederum zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten führt. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis die Strömungsgeschwindigkeit Werte erreicht hat, die kein Absetzen von Sedimenten mehr erlauben. Ein vollständiges Versperren des gesamten Querschnitts ist dadurch ausgeschlossen. Damit kann abschliessend gesagt werden, dass die Versorgung des SUSAN-Systems mit Kühlwasser aus der Aare bei laufendem Hilfskühlwassersystem gesichert ist.

4.1.3.2 Ausgefallenes Hilfskühlwassersystem, Einzelfehlerbetrachtung

Fällt das Hilfskühlwasser durch einen Einzelfehler = Ausfall des Diesels 090 aus, stehen beide Redundanten des SUSAN für die Nachwärmeabfuhr zur Verfügung: Beide CWS-Pumpen saugen Aarewasser an. Hierzu stehen bei einem PMF drei Saugstellen zur Verfügung, über die parallel angesaugt wird. Jeder dieser drei parallelen Pfade ist für die Versorgung des SUSAN ausreichend. Dies sind

- a) das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk in der Aare,
- b) das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk mit geodätischem Wassernachfluss aus dem Einlaufbauwerk,
- c) die Objektschutzabdeckung der Kammer des Hauptkühlwasserauslaufbauwerks.

Je nach Druckverlust zwischen CWS-Pumpe und Aare sowie je nach Aare-Pegel kommen die einzelnen Wege a) bis c) unterschiedlich zum Tragen. Die Auswirkungen des PMF auf die drei Ansaugwege werden im Folgenden betrachtet.

a) Hauptkühlwasserauslaufbauwerk

Durch den geringen Druckverlust zwischen Hauptkühlwasseraustritt in der Aare und den CWS-Pumpen wird der grösste Teil des Aarewassers über diesen Weg angesaugt.

Geschiebe und Kies erreichen das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk, siehe Ref. [13]. Die Versuchsergebnisse [12] der ETH-Zürich über mögliche Kiesablagerungen am Hauptkühlwasserauslaufbauwerk bei einem PMF, die allerdings ohne gleichzeitige Ansaugung von Wasser durch das Bauwerk modelliert wurden, zeigen Ablagerungen von Geschiebe und Kies am Bauwerk. Da mit Hilfe der Versuche das Verbleiben eines ausreichend offenen Ansaugquerschnitts nicht gezeigt werden konnte, wird konservativ von Kiesablagerungen und damit von einer unzureichenden Ansaugung von Aarewasser über den Hauptkühlwasserauslauf bzw. das SUSAN-Einlaufbauwerk ausgegangen.

b) Hauptkühlwasserauslaufbauwerk mit Wassernachfluss aus dem Einlaufbauwerk

Die CWS-Pumpen saugen Aarewasser aus der Kammer im Hauptkühlmittelauslaufbauwerk an. Durch die Wasserentnahme sinkt der Wasserspiegel in dieser Kammer gegenüber dem Hauptkühlwassereinlauf. Durch die Druckdifferenz zwischen Hauptkühlwassereinlauf- und -auslaufbauwerk ist davon auszugehen, dass Wasser aus dem Hauptkühlwassereinlauf in den Hauptkühlwasserauslauf nachfließt, wodurch in der Kammer des Hauptkühlwasserauslaufbauwerks genügend Aarewasser zum Ansaugen durch das CWS-System zur Verfügung steht^v. Aufgrund der technischen Dichtheit des Hauptkühlwassersystems, die den Kraftschluss zwischen Ein- und Auslaufbauwerk sichert, ist ein Nachströmen von Aarewasser über das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk bei allen Pegelständen zwischen Hoch- und Niedrigwasser möglich [14], wodurch die CWS-Wasserversorgung gewährleistet wird.

Da der Weg des angesaugten Aarewassers jenem bei laufendem Hilfskühlwasser entspricht, kann auch hier die unzulässige Beeinträchtigung der Aarewasserversorgung durch Geschiebe, Kies, Sand, Feinsedimente und organische Materialien ausgeschlossen werden (siehe Kap. 4.1.3.1). Positiv wirkt sich der gegenüber laufendem Hilfskühlwasser geringere angesaugte Wasservolumenstrom aus. Durch die geringere Strömungsgeschwindigkeit werden weniger Feststoffe angesaugt und der notwendige offene Strömungsquerschnitt ist geringer. Es resultiert eine noch höhere Robustheit gegen Verunreinigungen.

c) Objektschutzabdeckung

Das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk bezieht bei einem PMF zusätzlich Aarewasser über die Objektschutzabdeckung in der Decke des Gebäudes hinter dem Objektschutzzaun.

Mit Geschiebe und Kies ist nur auf der Sole der Aare zu rechnen. Eine Belastung des Zulaufs durch Geschiebe und Kies kann damit ausgeschlossen werden.

Gehölz, das durch das PMF mobilisiert wird, treibt an der Oberfläche der Aare. Es wird durch den Objektschutzzaun aufgehalten. Des Weiteren ist der Einlauf über die Objektschutzabdeckung horizontal angeordnet, so dass sich Treibgut schlecht festsetzen kann. Zudem ist der angesaugte Volumenstrom je Fläche der Objektschutzabdeckung gering, so dass Treibgut nicht vor der Einsaugöffnung durch Ansaugung festgesetzt werden kann.

Wasserpflanzen, die über den gesamten Aarequerschnitt verteilt vorkommen können und nicht am Objektschutzzaun aufgehalten werden, werden an der Objektschutzabdeckung angesaugt und können sich an den Einlassöffnungen (Gitter) absetzen. Dieses ist bei einem PMF zugänglich und kann rechtzeitig gereinigt werden.

Feinsedimente werden vom CWS angesaugt und in das System eingetragen. Sie können sich analog des in Kap. 4.1.3.1 beschriebenen Mechanismus in Totwassergebieten und Systemteilen mit geringer Strömungsgeschwindigkeit absetzen. Die resultierende Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit sichert ausreichend offene Strömungsquerschnitte im System und somit die Systemfunktion.

Die Aarewasserversorgung des CWS über den beschriebenen Zulaufweg funktioniert nur, wenn der Pegelstand über 465 m ü.M. liegt. Unterhalb dieses Pegelstands sind die Objektschutzabdeckungen nicht mehr genügend überflutet und es fließt zu wenig Wasser in das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk. Im Sinne einer letzten Defense-In-Depth Massnahme könnte in dieser Situation durch mobile Pumpen Aarewasser über die Objektschutzabdeckung in das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk gefördert werden; jedoch ist zu erwähnen, dass bei Pegelständen < 465 m ü.M. die Aarewasserversorgung des CWS über das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk mit Wassernachfluss aus dem Einlaufbauwerk erfolgen kann, siehe vorheriger Abschnitt.

^v Diese Ansaugung verzögert die Kiesablagerung des Kanals. Im günstigsten Fall stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, wobei eingetragenes Geschiebe durch die Leitungen und Kühler wieder der Aare zugeführt wird.

4.2 Massnahmen zur Verbesserung der Verfügbarkeit des Hilfskühlwassersystems

Ohne Hochwasserschutz würde der Pegel des PMF mit 466.25 m ü.M. zur Überflutung des Pumpenhauses inklusive der Hilfskühlwasserpumpen um 25 cm führen. Die Verfügbarkeit des Hilfskühlwassersystems wird mit montierbaren 90 cm hohen Hochwasserschutzwänden bis zu einem Wasserpegel von 466.9 m ü.M. sichergestellt.

Die Schutzwand innerhalb des Pumpenhauses verläuft zwischen den Siebbandmaschinen und den Haupt- bzw. Hilfskühlwasserpumpen. Die Anbindung an das Bauwerk erfolgt an den Hauptstahlträgern. Ausserhalb des Gebäudes führt die Schutzwand oberhalb der Kellerwand des Einlaufbauwerks, so dass im Bereich der Unterkellerung keine Wasserlast zu besorgen ist. Die Anbindung erfolgt am Mauerwerk des Einlaufbauwerks. Die Montage erfolgt mit im Boden eingelassenen Ankerplatten. Die Länge der gesamten Schutzwand beträgt ca. 40 m. Die Schutzwände sind dicht konstruiert. Etwaige Leckagen der Hochwasserschutzwand werden im Kellerbereich (ca. 150 m² netto) gesammelt und durch eine mobile Sumpfpumpe zurück in die Aare gefördert. Die Stromversorgung für die mobilen Pumpen wird durch ein vorgehaltenes Notstromaggregat gewährleistet.

Wenn nötig kann die Einrichtung innerhalb weniger Stunden aufgebaut werden. Dieser Zeitraum ist ausreichend, da die Karenzzeit zwischen dem Erkennen des Ereignisses und dem Überschreiten des Aarepegels von 466 m ü.M. ca. 15 h beträgt.

4.3 Weitere Studien und Massnahmen

Bei grösseren Schleppspannungen, verursacht durch grössere Unterschiede zwischen den Abflüssen in Aare und Saane, können u. U. grössere Mengen von Feststoffen mobilisiert werden. Deshalb sind auch bei einem Wasserpegel unter 466.25 m ü.M. (= Pegel PMF) Verstopfungen des SUSAN-Einlaufbauwerks nicht auszuschliessen. In [13] wurden verschiedene Kombinationen von Abflüssen in Aare und Saane korreliert, und ein Szenario entsprechend der Kombination mit der höchsten Schleppspannung analysiert.

Unter der Annahme des Ausfalls des Hilfskühlwassers zeigen Ergebnisse dieser Studie (siehe Ref. [13]) und der Modellversuche (siehe Ref. [12]), dass Verstopfungen des SUSAN-Einlaufbauwerks durch Geschiebe auch bei Ereignissen mit Jährlichkeiten grösser als das HQ10'000 bzw. PMF nicht auszuschliessen sind. Weil die Wasserpegel solcher Ereignisse aber kleiner sind als 466.25 m ü.M. steht das Hilfskühlwassersystem für die Kühlung in diesen Fällen zur Verfügung, und die Auswirkungen auf die Kühlwasserversorgung entsprechen den Auswirkungen wie in Kap. 4.1.3 dargelegt. Des Weiteren ist zu bemerken, dass ein allfälliges komplettes Verstopfen der Wasserfassung zeitverzögert auftritt (>100 h ab Anfang des Hochwasserereignisses).

Diese Szenarien (mit grösseren Jährlichkeiten) werden noch weiter untersucht. Das KKM plant jedoch, das Einlaufbauwerk SUSAN so nachzurüsten, dass Geschiebe generell nicht zu einer Verstopfung führen können. Die Abklärungen zur Nachrüstung sind im Gange.

4.4 Anlageverhalten

Das Anlageverhalten bei laufenden HiKW entspricht den Angaben im Kap. 2.2.2:

- Der Reaktor ist im Kühlbetrieb mit STCS/HiKW
- Niveauhaltung durch CRD
- Notstrombetrieb Strang 1+2 (Diesel 090)
- SUSAN steht mit Notstrombetrieb zur Verfügung (standby, nicht gestartet), die SUSAN-Wasserfassung ist nicht verstopft

Die Anlage wird sicher abgefahren und kann in einem sicheren (kalten) und stabilen Zustand gehalten werden.

Das Anlageverhalten bei ausgefallenem HiKW (Einzelfehler, Ausfall Diesel 090) kann wie folgt charakterisiert werden:

- Der Anlagebetrieb erfolgt über das Notstromsystem SUSAN, Stromversorgung durch Diesel 190 oder 290 (Bem. Eine Division genügt, d.h. die Stromversorgung ist einzelfehlerfest)
- RDB-Kühlkreislauf mit ALPS / PRV / Torus (ca. 40 t/h)
- Wärmeabfuhr aus dem Torus durch TCS / CWS an die Aare
- SUSAN-Wasserversorgung durch Nachströmen von Aarewasser über das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk

Auch bei diesem Szenario kann die Anlage in einem sicheren und stabilen Zustand gehalten werden. Zusätzlich stehen mobile Pumpen beim Abklingen des Hochwassers zur Nachspeisung über die Objektschutzabdeckungen zur Verfügung.

4.5 Dosisberechnung

Das HQ10'000 ist als Störfall der Kategorie 3 einzuordnen (Häufigkeit kleiner gleich 10^{-4} und grösser als 10^{-6} pro Jahr). Der zulässige Dosisgrenzwert für die Folgedosis in der Umgebung beträgt dementsprechend 100 mSv. Die Berechnung der Folgedosis erfolgt nach den Vorgaben der Richtlinie ENSI-G14.

Im Falle eines Hochwassers wird die Anlage wie oben beschrieben rechtzeitig abgeschaltet, bevor das Areal oder wichtige Gebäude überflutet werden. Beim Abschalten stehen alle erforderlichen Systeme zur Verfügung und die betrieblichen Grenzwerte entsprechend dem Abgabereglement des KKM werden eingehalten.

Ein Brennstoffschaden oder eine Freisetzung von Aktivität aus dem Kühlmittel ist unter diesen Bedingungen nicht zu erwarten, solange die Nachbespeisung des Reaktordruckbehälters und die Abfuhr der Nachzerfallwärme sichergestellt werden. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, sind auch beim PMF genügend Systeme verfügbar, um die erforderlichen Sicherheitsfunktionen bereitzustellen. Eine besondere radiologische Analyse ist für diesen Fall somit nicht erforderlich und die betrieblichen Grenzwerte werden eingehalten.

Weiterhin ist zu untersuchen, ob allenfalls durch das Eindringen von Wasser ins Maschinenhaus und in das Aufbereitungsgebäude radioaktive Stoffe, die dort in offenen Behältern gelagert sind, ausgespült und beim Abfließen des Wassers teilweise mitgeführt werden könnten. Die wesentlichen Behälter, die Aktivität enthalten können, sind die Harzsammelbehälter der Kondensatreinigungsanlage, die Sammelbehälter für die Harze der Clean-up- und Brennelementbecken-Reinigungsfilter und der Apparateentwässerungsbehälter. Die genannten Behälter befinden sich im Untergeschoss des Aufbereitungsgebäudes in geschlossenen Räumen.

Wie in Abschnitt 2.1 gezeigt, sind in den Untergeschossen der KKM-Gebäude bei einem PMF nur geringfügige Wasseransammlungen zu erwarten. Ein vollständiges Ausspülen der gesamten Aktivität aus diesem Bereich ist somit eine extrem konservative und unrealistische Annahme. Im Sinne einer einhüllenden Abschätzung wurde für den Fall, dass die gesamte Aktivität in den genannten Behältern ausgespült und an die Aare abgegeben wird, sowie unter Berücksichtigung weiterer konservativer Annahmen (z.B. keine Intervention zur Beeinflussung der Verzehrgeohnheiten, reduzierte Durchflussmenge) eine Folgedosis für die Bevölkerung von maximal 0.3 mSv für die am stärksten betroffene Bevölkerungsgruppe bestimmt¹⁵. Dieser Wert liegt in der Grössenordnung des quellenbezogenen Dosisrichtwertes und damit weit unterhalb des für dieses Szenario zu berücksichtigenden Dosisgrenzwertes. Bei der angegebenen, nach der Richtlinie ENSI-G14 berechneten Folgedosis handelt es

sich um eine fiktive Dosis für eine fiktive Person, also um eine reine Bewertungsgrösse. Es ist nicht zu erwarten, dass Dosisbelastungen in dieser Grössenordnung bei realen Personen tatsächlich auftreten.

5 Einfluss des PMF auf das Grundwasser

Das Grundwasser auf dem Gebiet des KKM-Areals stellt eine Mischung aus infiltrierendem Aarewasser und Hangwasserzuflüssen (Kluftwasser aus Molasse und / oder infiltrierendes Niederschlagswasser) dar.

Gemäss Kap. 2 ist bei einem PMF auf dem KKM-Areal mit einem Wasserstand von 466.25 m ü.M. zu rechnen: Weite Teile des Areals werden dabei überflutet. Es ist zu erwarten, dass sich der Anteil von Aarewasser am totalen Grundwasservorkommen im Vergleich zum Hangwasseranteil deutlich erhöht und der Grundwasserspiegel deutlich ansteigt. Die Ergiebigkeit des Grundwassers wird dagegen kaum beeinflusst. Da in der Konzeption des KKM das Grundwasser nicht für die Not(stands)kühlung vorgesehen ist, ist eine allfällige Beeinflussung jedoch nicht von sicherheitstechnischer Bedeutung.

Es ist anzunehmen, dass sich die Grundwasserqualität bei einem Hochwasserereignis bezüglich Trübungswerte und bakteriologischer Keimzahlen deutlich verschlechtert und nicht mehr den Trinkwasseranforderungen entsprechen würde.

Bezüglich Wassertemperatur wird angenommen, dass sich die Grundwassertemperatur derjenigen der Aare angleicht. Da die Aaretemperatur bei schlechtem Wetter eher geringer ist als die im Grundwasser gemessene Temperatur von 16 - 20 °C, ist nicht mit einem Temperaturanstieg im Grundwasser zu rechnen.

6 Regenwasserüberschwemmung auf dem KKM-Gelände

Bei einem Extremregenereignis werden die Dachabläufe und die Entwässerungsleitungen im KKM-Areal überlastet.

Die Dächer der Gebäude wurden im Rahmen der PSÜ¹⁶ auf „roof ponding“ untersucht. Beim Reaktorgebäude füllt sich die Rinne entlang dem Aussenzyylinder bis auf die Brüstungshöhe von 1.00 m mit Wasser. Dann fliesst das Wasser auf dem ganzen Umfang über die Brüstung und über den Aussenzyylinder ab. Die Zusatzbelastung für das Gebäude ist gering und kann von der Kuppel aufgenommen werden.

Auf dem Maschinenhausdach, das eine ringsum laufende Brüstung aufweist, könnten sich theoretisch grössere Wassermengen ansammeln. Deshalb wurde in allen vier Ecken zusätzlich zur normalen Dachentwässerung ein Ausspeier D = 300 mm eingebaut. Diese Entwässerungsrohre können die bei einem Starkregenereignis anfallenden Wassermengen ableiten. Die Dachflächen selber weisen ein für ein Flachdach ausserordentlich grosses Gefälle von 6% auf, so dass sich auch bei Maximaldurchbiegungen der Dachkonstruktion keine lokalen Wasseransammlungen bilden können.

Bei den übrigen Dächern sind die ringsum laufenden Ränder so niedrig, dass bei allen Gebäuden nachgewiesen werden konnte, dass die Traglast genügt, um die Wasserlast eines Sees bis Oberkante Rand aufzunehmen.

Die Strassen- und Platzentwässerung wird gefüllt, bis die Einlaufschächte überlaufen. Da das ganze Areal ± 15 cm auf der gleichen Höhenkote liegt, werden sich Pfützen und oberflächliche, langsam fließende Bäche bilden, die sich auf der ganzen Areallänge von 370 m auf der Nordseite seitlich in die Aare entwässern können. Wenn der Aarewasserpegel die Kote von 465.70 m ü.M. übersteigt, wird das Areal nach und nach überflutet und der Wasserspiegel auf dem Areal kommuniziert mit der Aare.

Der Hang auf der Westseite des Areals wird über einen Bach in die Aare entwässert. Lläuft die Bachrinne über, dient der dort verlaufende Wander- und Veloweg mit der äusseren Mauer der Überwachungsstrecke als Überlaufgerinne Richtung Aare.

Der Hang auf der Südseite hat mit der Erneuerung der Perimeter eine leistungsfähige Kanalisation erhalten. Lläuft diese über, erfolgt die Entwässerung über die Überwachungsstrecke Richtung Osten. Wenn beide Mauern der Überwachungsstrecke überströmt werden, fliesst Wasser über die Wiese in das Areal und gelangt über die beim Areal beschriebenen Wege zur Aare.

Auf der Ostseite gelangt das Wasser aus dem Gelände und der Zufahrtsstrasse über eine eigene Kanalisationsleitung in die Aare. Wenn diese überläuft, gelangt das Wasser oberflächlich über die Strasse und den Parkplatz des Kraftwerks zur Aare.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei einem Extremwasserereignis wie das HQ10'000 die Regenwasserüberschwemmung auf dem KKM-Gelände beherrscht wird.

7 Zusammenfassung

Das KKM hat gemäss der Forderung 3.2 aus der ENSI-Verfügung vom 1. April 2011 deterministisch die Beherrschung eines meteorologischen 10'000-jährlichen Hochwassers (HQ10'000) geprüft.

Für den Auslegungsstörfall HQ10'000 wurden konservativ die Wasserpegel bzw. Abflüsse des sog. PMF (Probable Maximum Flooding) angenommen. Für dieses Ereignis wird, gemäss der o.g. Forderung des ENSI, ein Ausfall der externen Stromversorgung postuliert.

Basierend auf dem PMF wurden zahlreiche Studien durchgeführt. Ein zentrales Thema war die mögliche Verstopfung der Wassereinlaufbauwerke für das (Not)Kühlwasser. Weil die Analysen kein eindeutiges Bild zeigten, wurden zusätzlich Modellversuche zur Verifizierung dieser Analysen gemacht. Die Ergebnisse all dieser Untersuchungen wurden durch das KKM unter Berücksichtigung des Standes der Anlage und der Notfallvorschriften per 30. Juni 2011 bewertet.

Das KKM ist in der Lage, das PMF mittels konventionellen Systemen zu beherrschen. Nachdem die Anlage bereits vor dem Erreichen des höchsten Wasserpegelstands ordnungsgemäss abgeschaltet worden ist und das Hauptkühlwasser ausser Betrieb ist, steht das Hilfskühlwassersystem weiterhin für die Kühlung zur Verfügung: Das Notstandskühlsystem SUSAN wird bis zum Eintritt des Notstromfalls nicht angefordert. Eine Verstopfung der Wassereinlaufbauwerke kann in dieser Situation ausgeschlossen werden.

Sollte durch einen Ausfall des Notstromdiesels das Hilfskühlwasser ausfallen (für Auslegungsstörfälle zu berücksichtigender Einzelfehler), wird das SUSAN-System angefordert. Gemäss der neuesten Studien und Modellversuchen wird das Hauptkühlwasserauslaufbauwerk vom durch das Hochwasser mobilisierten Geschiebe beeinträchtigt (Kiesablagerungen). Somit ist - im Gegensatz zu den bisherigen Analysen - eine Verstopfung des SUSAN-Einlaufbauwerks, das mit dem Hauptkühlwasserauslaufbauwerk verbunden ist, nicht auszuschliessen. Durch zusätzliche betriebliche Massnahmen (Wasserschutzwände im Pumpenhaus und mobile Pumpen), die über die Betriebsnotfallanweisungen eingeleitet werden, wird sichergestellt, dass dem SUSAN-System über das Hauptkühlwassereinlaufbauwerk genügend Kühlwasser zur Verfügung steht, d.h. die Anlage kann auch in diesem Fall in einen sicheren Zustand überführt werden. Diese Massnahmen werden bereits vor dem höchsten Wasserpegelstand ergriffen: Weil bei einem Hochwasserereignis der Wasserpegel nur langsam ansteigt, ist dazu genügend Zeit vorhanden.

Aus Sicht des KKM ist damit der deterministische Nachweis zur Beherrschung des 10'000-jährlichen meteorologischen Hochwassers erbracht. Die genannten baulichen und betrieblichen Massnahmen wurden, aufgrund der Erkenntnisse der Untersuchungen, im Verlauf der Nachweiserbringung eingeleitet und per 30. Juni 2011 umgesetzt. Diese müssen in nächster Zeit validiert werden. Aus diesem Grund hat sich die BKW entschieden, die Anlage vorzeitig zur Jahresrevision herunterzufahren.

Zusätzlich zu den in diesem Bericht beschriebenen Massnahmen zur Beherrschung des HQ10'000, besteht die Möglichkeit eine langfristige Wärmeabfuhr gemäss Accident Management Massnahmen durchzuführen. Auch in diesem Szenario würden die Dosisgrenzwerte der Strahlenschutzverordnung für einen Auslegungsstörfall der Kategorie 3 eingehalten.

Referenzen:

-
- ¹ TB-042-RS080011 v.02, Sicherheitsbericht EKKM, Unterlage zum Gesuch zur Rahmenbewilligung für das Ersatzkraftwerk Mühleberg (EKKM) aus Dezember 2008
 - ² ENSI 13/10 „Gutachten ENSI zum Rahmenbewilligungsgesuch der EKKM AG“ vom September 2010
 - ³ Schälchli, Abbegg & Hunzinger: „Hochwasser an Aare und Saane bei der Saanemündung, Überflutungsgefährdung des Kernkraftwerks Mühleberg“ vom 19. April 2006
 - ⁴ KKM - Checkliste „Gebäudeschutz bei Hochwasser“ CL11-18160
 - ⁵ Entscheidungshilfe für Hochwasserereignisse der Aare beim KKM, AN-AS-07/005 Rev. 2
 - ⁶ Betriebs-Notfallanweisung „Überflutung Kraftwerksareal“ BNA-B-001
 - ⁷ Betriebs-Störfallanweisung „Ausfall Hilfskühlwasser“ BSA-B-013
 - ⁸ BKW Bericht M. Dänzer „Standicherheit der Wehranlage infolge Extremhochwasser PMF“ vom 15. Juni 2011
 - ⁹ Entreprise Electriques Fribourgeoises, Barrage de Rossens – Sécurité de l'aménagement en cas de crues, Lombardi SA, 1993
 - ¹⁰ Bundesamt für Wasser und Geologie (heute Bundesamt für Energie), Sicherheit der Stauanlagen, Richtlinie des BWG, Version 1.1, November 2002
 - ¹¹ Entreprise Electriques Fribourgeoises, Barrage de Schiffenen – Contrôle de la crue de projet et des organes de décharge, Lombardi SA, 1987
 - ¹² Bericht VAW (Versuchsanstalt für Hydraulik, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich) „Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche Kernkraftwerk Mühleberg“ vom 28. Juni 2011
 - ¹³ Bericht Fa. Flussbau AG, Bern „Auswirkungen eines Hochwassers HQ10'000 der Aare auf die SUSAN-Wasserfassung“ vom 24. Juni 2011
 - ¹⁴ Bericht Fa. AREVA NP, Erlangen „Bewertung der gesicherten Kühlwasserversorgung aus der Aare bei 10'000 jährigem Hochwasser unter Berücksichtigung möglicher Verschlammung“, PESS-G/2011/de/0060 Rev. A vom 30. Juni 2011
 - ¹⁵ Aktennotiz AN-SU-2011/053 „Berechnung von Folgedosen aus externen Überflutungsszenarien“ von 2011
 - ¹⁶ KKM - Bericht zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) „Sicherheitstechnisch wichtige Gebäude und systemübergreifende Aspekte Bautechnik“, PSÜ-KL-2010/502 von 2010