Der TEC-SIM Report – 2 Jahre Fukushima

Fehler im Design, Fehler bei der Genehmigung und Fehler des Betreibers führten zur Katastrophe in Fukushima Daichi im März 2011 und welche Konsequenzen man in Deutschland ziehen sollte.

mail@tec-sim.de

11.4.2013

Die Katastrophe von Fukushima lässt sich auf bestimmte Fehler und Sicherheitsdefizite der Anlage Fukushima Daichi zurückführen, die der Designer, die Genehmigungsbehörde und der Betreiber zu verantworten hat.

Die Tabelle liste die Fehler auf.

	Designfehler
D1	Als schwerwiegender Fehler beim Design der Anlage ist der Steilhang hinter den Blöcken anzusehen, der dazu führte, dass die anrollende Tsunami-Welle nicht flach weiter ins Landesinnere läuft sondern sich hier zu großer Höhe aufstaut und längere Zeit ansteht, bevor sie wieder abfließt. (Design-Fehler Nr.1)
D2	Die Installation der Notstromdiesel und der Verteilerschränke im Keller des Turbinenhauses ist als ein schwerwiegender Design-Fehler (Design-Fehler 2).
D3	Es ist ein schwerwiegender Design-Fehler, dass die passiven Sicherheitssysteme, die ohne ständige Stromversorgung auskommen, nicht so geschaltet waren, dass sie bei einem totalen Stromausfall zuverlässig starten und solange in Betrieb bleiben, bis die Stromversorgung der Anlage wieder hergestellt ist. (Design-Fehler Nr. 3)
D4	Das Design des Systems zur kontrollierten Druckentlastung enthält schwer wiegende Design-Fehler. Das System ist nicht sauber getrennt sondern mit anderen Sicherheitssystemen vernetzt. Das System verfügt nicht über eine

	separate und redundante Stromversorgung und Leittechnik für den Fall eines totalen Stromausfalls, was bei einem "finalen" System der Fall sein sollte, und funktionierte erst nach Handeingriff. Das System verfügt über keine Filter. Das System stellt nicht sicher, dass Wasserstoffgas gefahrlos abgeblasen werden kann. (Design-Fehler Nr. 4)
D5	Die passiven Sicherheitseinrichtungen IC, RCIC und HPCI verfügen nicht über eine separate und redundante Stromversorgung und Leittechnik für den Fall eines totalen Stromausfalls. (Design-Fehler Nr. 5)
D6	Die Abklingbecken verfügen nicht über ein eigenes separates und redundantes Kühlsystem für den Fall des Ausfalls der Reaktorkühlung sondern sind mit Reaktorkühlung vernetzt. (Design-Fehler Nr. 6)
D7	Die Abklingbecken sind (möglicherweise) nicht mit Anti-Syphon-Einrichtungen ausgestattet, die wirkungsvoll eine Rückwärtsströmung in den Einspeiseleitungen verhindern. (Design-Fehler Nr. 7)
D8	Es ist ein schwer wiegender Design-Fehler, dass die Anlage im Grundwasser steht und der Grundwasserspiegel nicht deutlich unter der Bodenplatte der Anlage liegt und auch kein System zur Kontrolle des Grundwasserspiegels vorhanden ist. (Design-Fehler Nr. 8)
	Genehmigungsfehler
G1	Es ist ein schwerwiegender Fehler der Genehmigungsbehörde den Reaktor zu genehmigen, ohne in der Lage zu sein, zuverlässig die "maximalen Tsunami-Höhen" abzuschätzen. (Genehmigungsfehler Nr. 1)
G2	Es ist ein schwerwiegender Genehmigungsfehler, dass die Gebäude im unteren Teil der Anlage nicht gegen kurzfristige Überflutung durch Wasser oder Schlamm ausreichend gesichert waren. (Genehmigungsfehler Nr.2)
G3	Es ist ein schwerwiegender Fehler der Genehmigungsbehörde, dass sie keine klaren Kriterien für die Evakuierung auf der Basis der Störfallanalysen festgelegt hat. (Genehmigungsfehler Nr. 3)
G4	Es ist ein schwer wiegender Fehler der Genehmigungsbehörde, dass sie

	keine klaren Kriterien für die Einrichtung der Sperrzone festgelegt hat. (Genehmigungsfehler Nr. 4)
	Betreiberfehler
B1	Es ist ein schwerwiegender Fehler des Betreibers, dass er die Empfehlungen für Notfall-Maßnahmen für den Störfall "station black-out" nicht adäquat umgesetzt hat. (Betreiber-Fehler Nr.1)
B2	Es ist ein schwer wiegender Fehler des Betreibers, dass er nicht ausreichend dafür gesorgt hat, dass die benötigte mobilen Geräte und die erforderliche Bedienungsmannschaft zur Verfügung standen und die Bedienungsmannschaft ausreichend geschult war. (Betreiber-Fehler Nr.2
B3	Es ist ein schwerwiegender Fehler des Betreibers, dass er die Betriebsfeuerwehr nicht adäquat ausgerüstet und ausgebildet hat, dass sie zu einer Schadensbegrenzung nach dem Tsunami wesentlich beigetragen hat. (Betreiber-Fehler Nr. 3)

Der schwerwiegendste Fehler ist der Fehler des Betreibers B2. Zwar hatte der Betreiber Vorkehrungen für den Anschluss mobiler Geräte getroffen Die dazu benötigte Anschlussleitung („fire protection line“) war in den Blöcken installiert worden, aber die Anlage verfügte nicht über ausreichend erforderliche Geräte, also mobile Pumpen, mobile Generatoren und Tankfahrzeuge und der Betreiber hatte es auch offensichtlich unterlassen, dass Personal für diesen Notfall zu trainieren. Von den drei Feuerwehrfahrzeugen zur mobilen Einspeisung gingen beim Tsunami zwei verloren und es gab auch in der Nähe keinen schnell verfügbaren Ersatz.

Aus der Analyse der Unfallursachen ergeben sich acht Forderungen für deutsche Atomkraftwerke, die im Anhang 2 ausführlich diskutiert werden und – wenn man die Reaktorsicherheit ernst nehmen würde - ein unabdingbare Voraussetzung für den Weiterbetrieb der in Deutschland am Netz verbleibenden acht Atomkraftwerke sind.

	Forderung
1	Schutz gegen den Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs
2	Notfall-System zur Druckentlastung des Primärkreises bei Schweren Störfäl-

	len zur Verhinderung des Versagens auf dem Hochdruckpfad
3	Ertüchtigung der Stromversorgung durch die Notstrom-Diesel-Generatoren
4	Autarkes Notfall-System zur Kern- und Containmentkühlung bei Schweren Störfällen
5	Analoge Leittechnik für die Steuerung der Anlage bei Befall mit einem Computer-Virus und bei Schweren Störfällen
6	Vorbereitung von externen Notfall-Maßnahmen bei Schweren Störfällen beim Betreiber
7	Schaffung eines Interventionsteam für Schwere Störfälle
8	Aktive Vorbereitung auf großräumiger Evakuierung mit Plänen auch für ausreichenden Auffanglager

Inhalt

1 Das Atomkraftwerk Fukushima 7

2 Der General Electric Mark I Siedewasserreaktor 10

3 Das Erdbeben 27

4 Der Tsunami 31

5 Die Notfallvorbereitungen für den totalen Stromausfall 37

6 Die ersten Stunden 41

6.1 Vorbemerkung 41

6.2 Block 1 43

6.3 Block 2 47

6.4 Block 3 48

6.5 Konsequenzen aus dem Versagen der passiven Systeme 49

6.6 Mobile externe Einspeisung 50

7 Die Explosionen 54

8 Die radioaktive Emission und Evakuierung 71

9 Die radioaktive Immission und die Strahlenbelastung 80

10 Schadensbegrenzung und Aufräumarbeiten 88

11 Anhang 1: Voraussetzungen zum Weiterbetrieb deutscher Reaktoren 100

11.1 Vorbemerkung 100

11.2 Schutz gegen den Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs 100

11.3 Notfall-System zur Druckentlastung des Primärkreises bei Schweren Störfällen zur Verhinderung des Versagens auf dem Hochdruckpfad 102

11.4 Ertüchtigung der Stromversorgung durch die Notstrom-Diesel-Generatoren 104

11.5 Autarkes Notfall-System zur Kern- und Containmentkühlung bei Schweren Störfällen..... 106
11.6 Analoge Leittechnik für die Steuerung der Anlage bei Befall mit einem Computer-Virus und bei Schweren Störfällen 110
11.7 Vorbereitung von externen Notfall-Maßnahmen bei Schweren Störfällen beim Betreiber 111
11.8 Schaffung eines Interventionsteam für Schwere Störfälle 112
11.9 Aktive Vorbereitung auf großräumiger Evakuierung mit Plänen auch für ausreichenden Auffanglager 114

12 Anhang 2 - Schadensbilder..... Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Das Atomkraftwerk Fukushima

Vor dem 11.3.2011 kannte kein Mensch außerhalb von Japan den Namen Fukushima und selbst weit gereiste Nuklearexperten hatten noch nie davon gehört.
An der Westküste Japans ca. 200 km nördlich von Tokio in der Provinz Fukushima betrieb der japanische Stromkonzern TEPCO (Tokio Electric Power Company) zwei Atomanlagen mit der Bezeichnung Fukushima, die ohne viel Phantasie die Namen Fukushima 1 (Fukushima Daichi) und Fukushima 2 (Fukushima Daini) erhalten hatten.

Die Anlage Fukushima Daichi besteht aus sechs älteren Siedewasserreaktoren. Alle sechs Blöcke sind Nachbauten amerikanischer Siedewasserreaktoren, die Blöcke 1 bis 5 vom Typ General Electric Mark I, der Block 6 ist vom Typ General Electric Mark II. Deshalb trifft im Wesentlichen alles, was man im Internet zu diesen beiden Reaktortypen findet, auch auf die sechs Blöcke in Fukushima zu.

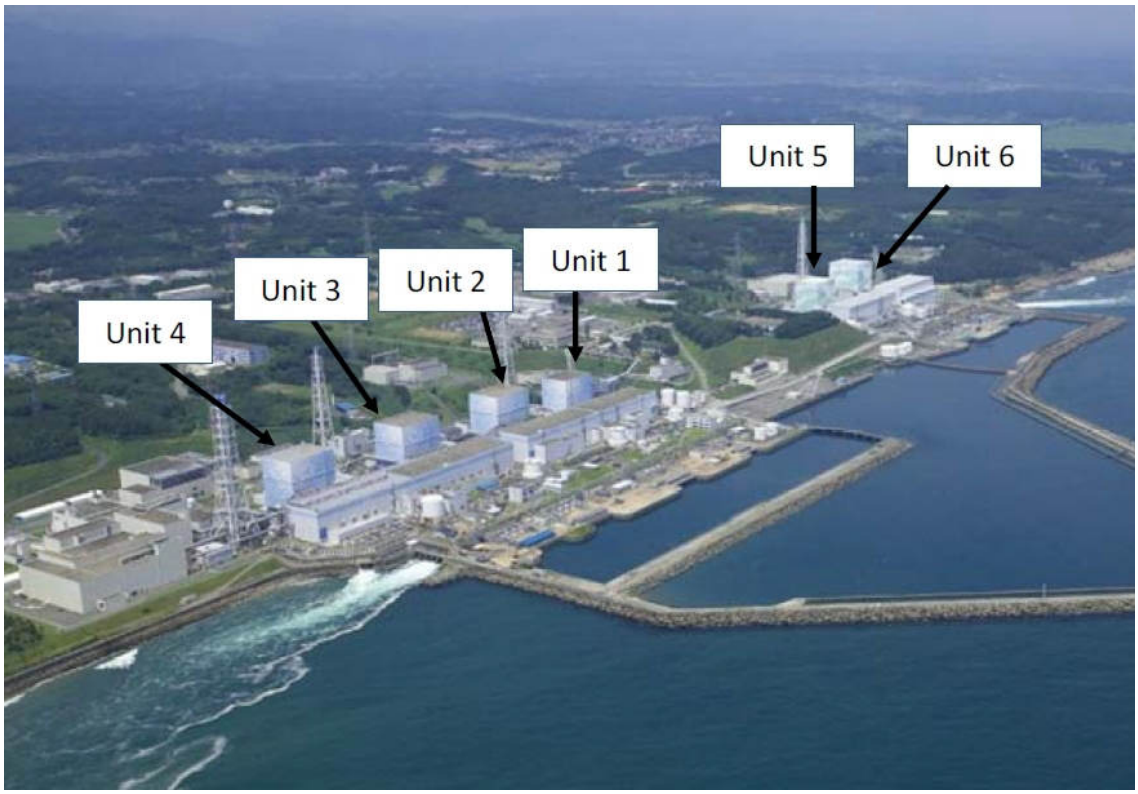
Von Interesse sind nur die vier verunglückten Blöcke 1 bis 4. Block 1 ist etwas kleiner und hatte nur eine Leistung 439 MW, die Blöcke 2 bis 4 sind mehr oder weniger baugleich und haben eine Leistung von MW 760 MW, also deutlich kleiner als typische deutsche Reaktoren mit 1200 MW.

Block 1 ging im Jahr 1973 ans Netz, Block 2 im Jahr 1974, Block 3 im Jahr 1974 und Block 4 im Jahr 1978. In Hinblick auf eine geplante Lebensdauer der Blöcke von 40 Jahren aus, könnte man sie als Oldtimer bezeichnen. Was die Reaktorsicherheit angeht, sind sie sicher Oldtimer und nicht auf dem letzten Stand der Reaktorsicherheit.

Die vier Blöcke wurden an einem Küstenhang am Meer errichtet, wozu eine größere Fläche planiert wurde. Hinter den Kraftwerken befindet sich dann ein steiler Hang, wie man gut auf dem Foto der vier Blöcke aus besseren Tagen sieht.

Der Bauplatz war nicht schlecht gewählt: Direkt am Meer, was eine ständige Verfügbarkeit von Kühlwasser garantiert. An der Ostküste Japans, wo die meiste Zeit Westwind weht und alle gasförmigen radioaktiven Freisetzungen in die Weiten des Pazifiks geweht werden und nicht in die nächsten Großstadt. Die Gegend ist recht dünn besiedelt, so dass in der gesetzlich vorgeschriebenen zur Evakuierung vorgesehenen Zone sehr wenige Menschen leben und eine Evakuierung relativ leicht möglich ist - wie es sich dann auch gezeigt hat. Die Umgebung ist auch nicht landwirtschaftlich intensiv genutzt, ein weiterer Pluspunkt bei der Standortwahl. Gegen die beiden bekannten schwerwiegenden Naturgefahren, schwere Erdbeben und Tsunamis hatte man nach dem Stand von Wissenschaft und Technik ausgelegt. Man glaubte, dass die Blöcke hoch genug liegen außerhalb der Reichweite der theoretisch größtmöglichen Tsunami-Welle, was sich als fataler Irrtum herausstellen sollte.

Als schwerwiegender Fehler beim Design der Anlage ist der Steilhang hinter den Blöcken anzusehen, der dazu führte, dass die anrollende Tsunami-Welle nicht flach weiter ins Landesinnere läuft sondern sich hier zu großer Höhe aufstaut und längere Zeit ansteht, bevor sie wieder abfließt. (Design-Fehler Nr.1)

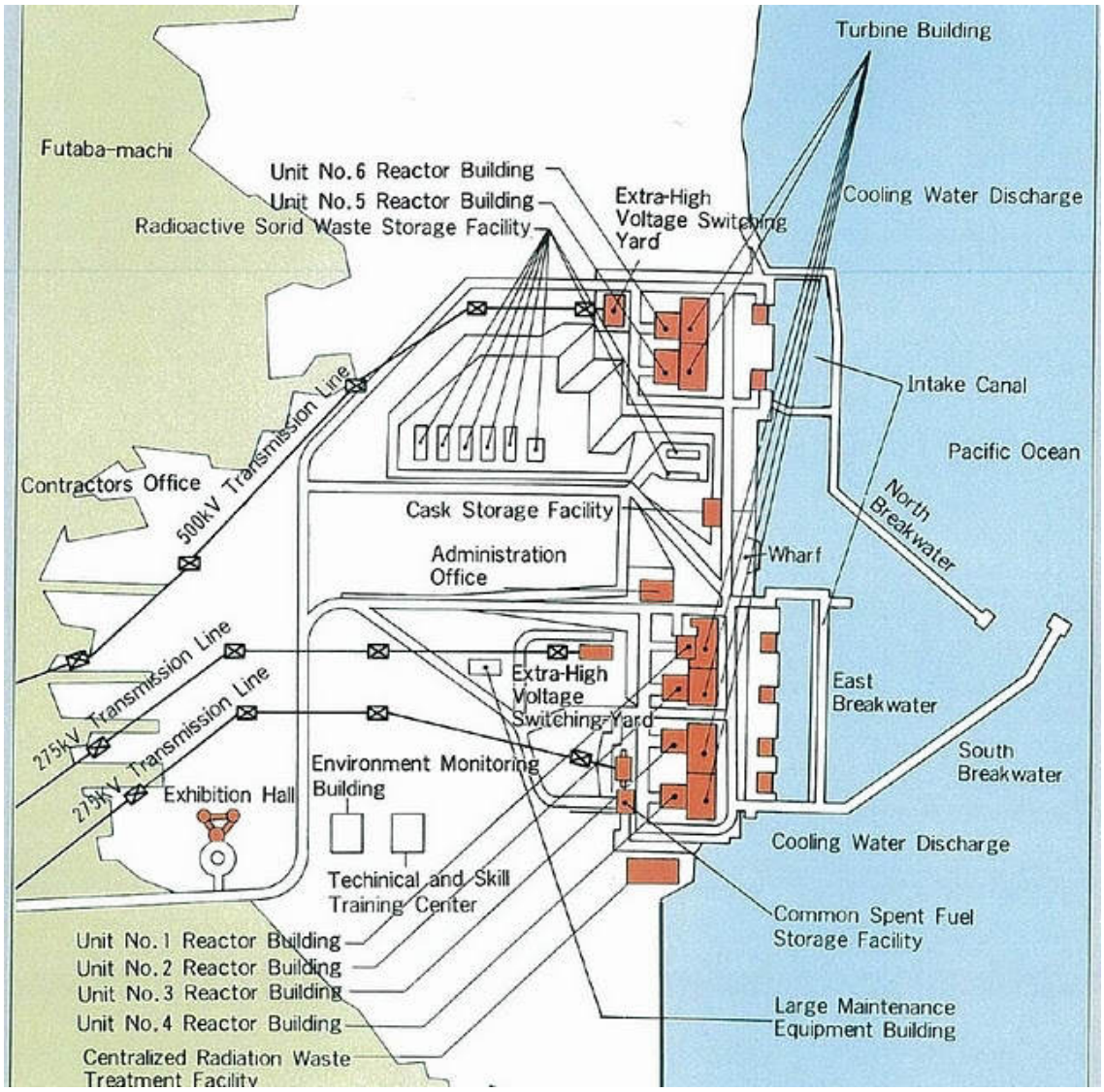


Die wesentliche Fakten zu den vier Blöcken in Fukushima

Block 4 war zum Zeitpunkt des Erdbebens abgeschaltet. Der gesamte Kern befand sich in dem Abklingbecken außerhalb des Containments.

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
elektrische Leistung [MW]	460	784	784	784
thermische Leistung [MW]	1380	2381	2381	2381
Brennelemente im Reaktorkern	400	548	548	---
Brennelemente im Lagerbecken	292	587	514	1331

Zur besseren Orientierung hier noch der Plan der Anlage mit den Namen der Gebäude.



2 Der General Electric Mark I Siedewasserreaktor

Nukleare Sicherheit ist im Grunde ganz einfach. Man baut mehrere Hüllen um den Brennstoff, in dem sich bei der Kettenreaktion die radioaktiven Zerfallsprodukte bilden und sorgt dafür, dass der Kern immer ausreichend gekühlt ist. Beim General Electric Mark I Reaktor gibt es vier Sicherheitsbarrieren, die versagen müssen, damit Radioaktivität in die Umgebung gelangen kann: die Hüllrohre der Brennstäbe, der Reaktordruckbehälter (RDB), das Containment, auch eingedeutscht Sicherheitsbehälter genannt, und dann noch das Reaktorgebäude. Und die Faustregel besagt, solange die

Brennstäbe unter Wasser stehen, können sie nicht versagen, das heißt: vordringliche Aufgabe der Mannschaft ist es dafür zu sorgen, dass immer genug Kühlwasser im RDB steht.

Das Design des General Electric Mark I könnte man als etwas eigenartig oder eigenwillig bezeichnet und wurde von Anfang an heftig kritisiert, was dazu führte, dass General Electric rasch die Baureihe modifiziert, da es sich schnell herum sprach, dass der Mark I kein großer Wurf war, es folgte rasch der modifizierte Entwurf Mark II, der auch nicht viel besser war, dann der ebenfalls ungelungene Mark III und dann stellte General Electric die Produktion ein. In Deutschland hatte die General Electric Tochter AEG auch nicht mehr Glück mit ihrer deutlich besseren Baureihe SWR 69. Nach dem Störfall in Würgassen war AEG de facto pleite und wurde von Siemens übernommen und ging in der KWU auf.

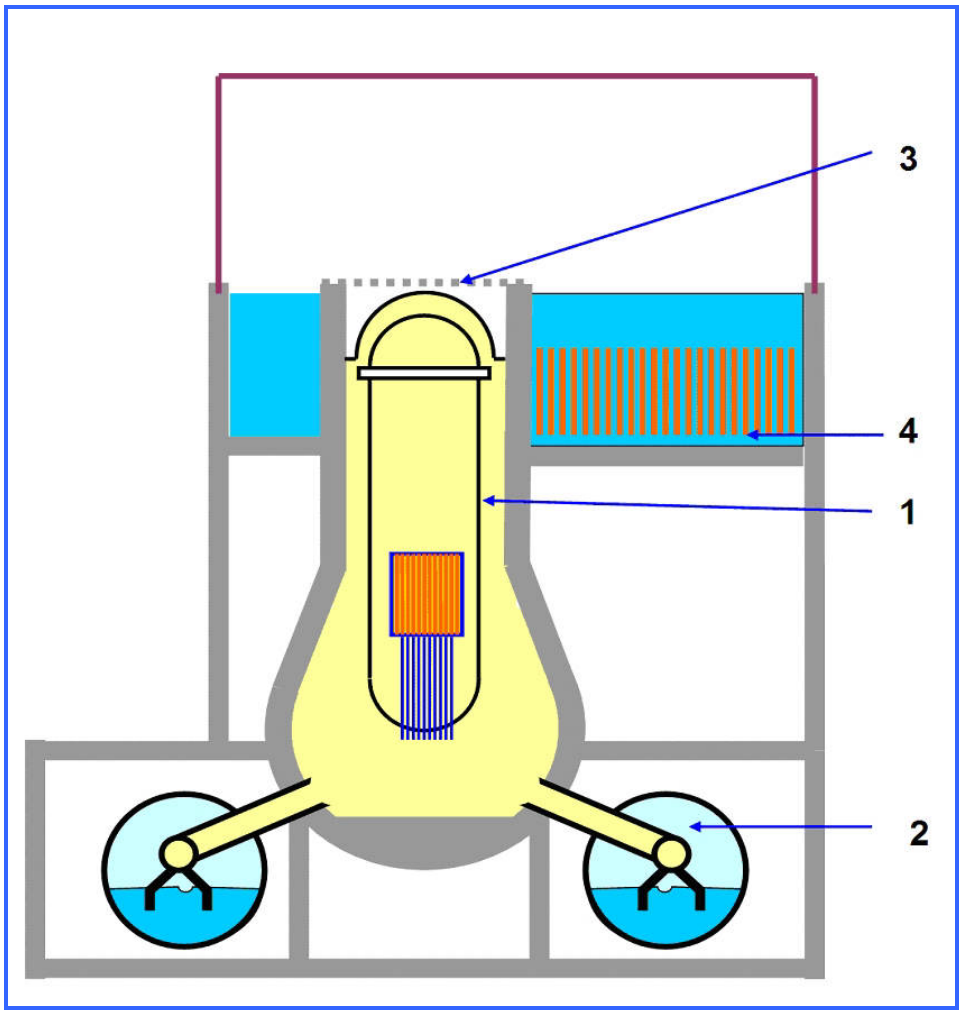
Der Mark I kombiniert gleich eine ganze Anzahl von Merkwürdigkeiten, das Auffallendste ist das Containment in Form einer Birne mit einem Torus. Das Bild zeigt ein Mark I Containment im Bau. Das Containmet besitzt ein sogenanntes Kondensationssystem, mit dem der Dampf, der bei einem Störfall ins Containment freigesetzt wird, konsensiert wird. Dazu besteht das Containment aus zwei getrennten Kammern, dem "Drywell", in dem die Freisetzung erfolgt und dem "Wetwell", in den der Dampf dann überströmt, wobei er kondensiert wird.

Auf dem Bild sieht man die "Birne" des Drywell, den Torus des "Wetwells", die dicken Kondensationsrohre vom Drywell in den Wetwell, die große Schleuse um vom Reaktorgebäude in den Drywell zu gelangen und die zahllosen Rohre, die durch die Wand der Drywell-Birne führen. Um von oben an den Reaktordruckbehälter (RDB) zu gelangen und die Brennelemente wechseln zu können, hat die Drywell einen Deckel aus Stahl, der im Vordergrund zu sehen ist und später oben auf der Birne mit Schrauben befestigt wird.

Das Containment besteht aus den zwei druckfesten Räumen Drywell (1) (hellgelb) und Wetwell (2) (hellblau). Der Wetwell wird auch mit Kondensationskammer bezeichnet. In der Kondensationskammer befindet sich ein großer Wasservorrat (dunkelblau), der zu Kühlzwecken genutzt werden kann. Das Containment besteht aus Beton mit einem innen liegenden "Liner" (eine Art Blechauskleidung) aus Stahl. Oben auf dem Containment ist der Deckel aus Stahl (3), über dem Betonplatten zur Abschirmung der Strahlung liegen. Diese Platten verhindern, dass man den Deckel von außen kühlen kann. Mit Wasser von oben draufsprühen ist da nicht viel zu erreichen, anders als im Fernse-

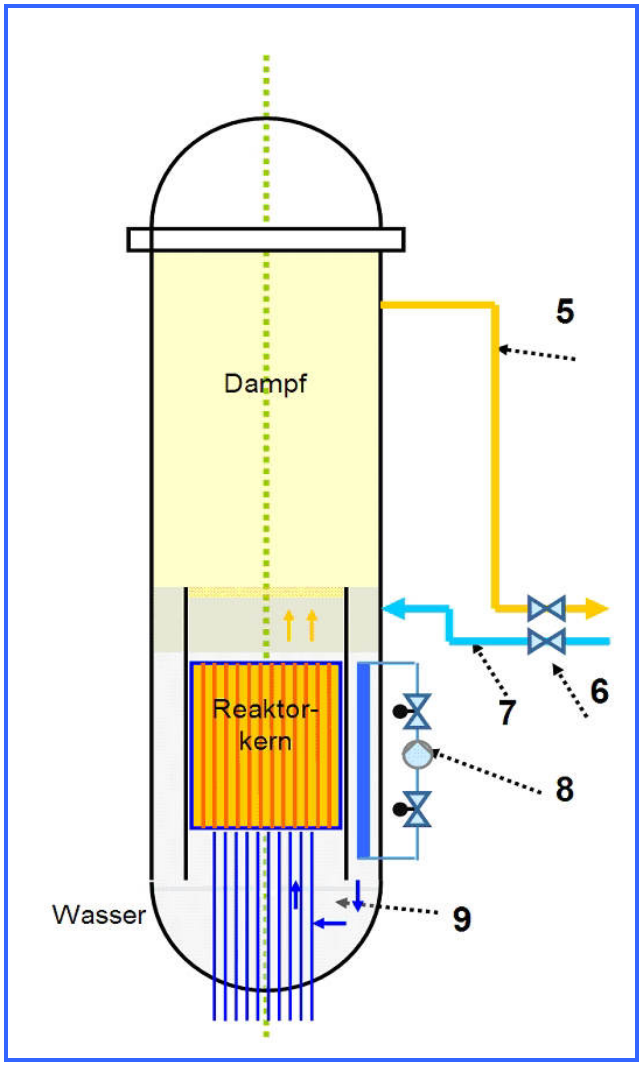
hen suggeriert. Das Abklingbecken (4) für die abgebrannten Brennelemente liegt außerhalb des Containments und ist eine Art Swimmingpool auf der obersten Etage des Rektorgebäudes. Das Reaktorgebäude ist zwar nicht druckfest, da es in keinem Störfallszenario dort zu einem Druckaufbau kommen kann, aber luftdicht und wird kontrolliert belüftet, d.h. die Abluft wird gefiltert und über den Kamin abgegeben.

Die Designlösung, das Abklingbecken außerhalb des Containments zu legen, ist die besser technische Lösung. Wie der Störfall in Fukushima gezeigt hat, ist es dann möglich, das Abklingbecken zu kühlen auch wenn der Reaktorkern schmilzt. Ist dagegen, wie bei vielen (auch den deutschen) Druckwasserreaktoren das Abklingbecken innerhalb des Containments, dann führt der Verlust der Kühlung des Reaktors auch zum Verlust der Kühlung des Abklingbeckens und die Radioaktivität der Brennelemente im Abklingbecken wird ebenfalls freigesetzt.



Der eigentliche Reaktor befindet sich im Drywell (1). Das Reaktordruckgefäß (RDB) ist im Grunde nichts als ein riesiger Wasserkocher. Der Reaktorkern, in dem die eigentli-

che Kettenreaktion abläuft, befindet sich im unteren Teil. Darunter befindet sich ein weitgehend leerer Raum, die untere Kugelkalotte, durch den die Führungsrohre der Steuerstäbe laufen. Eine Besonderheit des Siedewasserreaktors ist, dass die Steuerstäbe von unten hydraulisch in den Kern geschoben werden. Der Kern besteht im Wesentlichen aus einer Blechtonne voller Brennelemente, das sind längliche viereckige Kästen, in denen die dünnen etwa fingerdicken Brennstäbe angeordnet sind. Es gibt 144 Brennelemente mit ca. 50.000 Brennstäben. Der Kern ist bis zur Oberkante mit Wasser gefüllt. Das Ganze ist die technische Lösung des Problems wie man aus verschiedenen Elementen einen möglichst homogenen Kern herstellt und gleichzeitig die Wärme abführt. Im Betrieb fängt das Wasser an zu kochen, wie im Wasserkocher - nur bei höherem Druck und höheren Temperaturen. Der Dampf steigt nach oben und wird über die Frischdampfleitung (5) zur Turbine geführt, dort kondensiert und über die Speisewasserleitung in den Kern zurückgefördert (7).



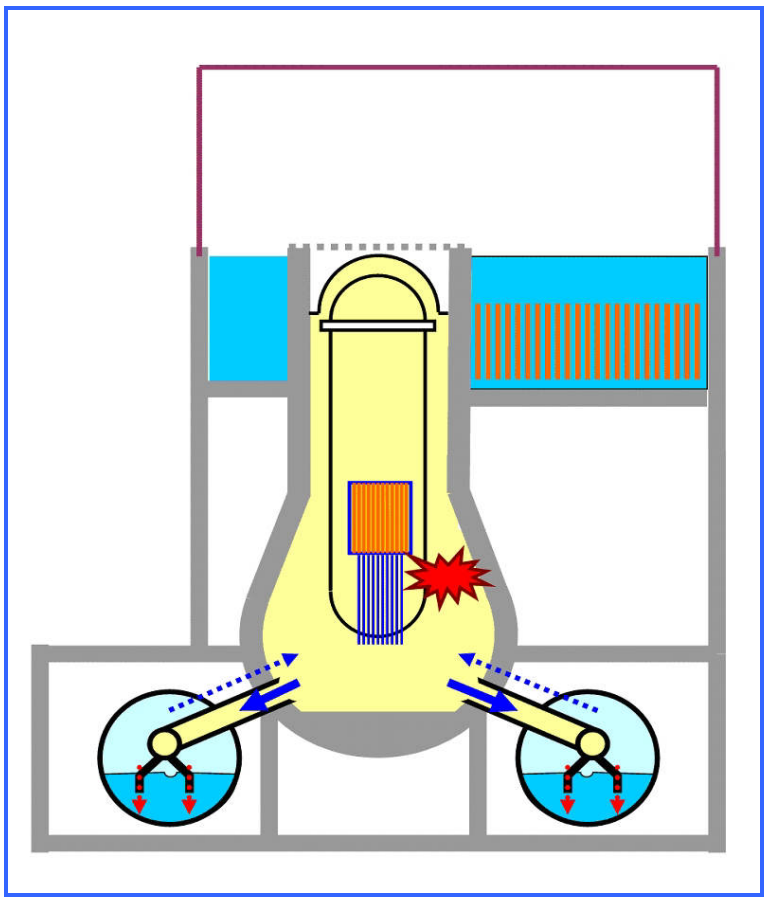
Die Kühlmittelförderung erfolgt über Jetpumpen, deren Jet-Teil (8) sich im RDB befindet und die elektrischen Antriebe mit der Pumpe außerhalb. Im Jet-Teil wird durch den Wasserstrahl aus der Pumpe in einer Art Düse das Wasser oberhalb mitgerissen und beschleunigt und dadurch in den Reaktorkern gepresst (9).
Bei Bedarf und insbesondere bei einem Störfall können diese Leitungen durch Ventile geschlossen werden. Grundsätzlich gilt, dass alle Leitungen durch die Containmentwand über zwei Ventile verfügen, eins innen und eins außen, um sicherzustellen, dass sich das Containment druckdicht verschließen lässt. Oft sind dies unterschiedliche Ventile, entweder elektrisch oder hydraulisch oder mit Druckluft.

Die Kernspaltung im Kern erzeugt den Dampf entsteht im RDB und treibt die Turbine und wird unter der Turbine im Kondensator durch Kühlung mit Meerwasser in Wasser zurückverwandelt. Die Turbine im Turbinenhaus erzeugt somit aus dem Dampf den elektrischen Strom.

Der Kühlkreislauf RDB -> Turbine und zurück ist zweimal und von einander getrennt vorhanden. Das nennt man 2-Loop-Anlage. Dadurch ist vorgegeben, dass auch alle Sicherheitssysteme zweimal vorhanden sein müssen. Die Zeichnung zeigt nur die eine Hälfte. Die gezeigten Systeme sind betriebliche Systeme und können im Notfall bei Bedarf über die Ventile geschlossen werden.

Der Hauptgrund für die Einführung des Containments im Reaktorbau war der hypothetische Störfall "Bruch einer Haupt-Kühlmittel-Leitung, der sicher beherrscht werden soll. Bei einem Kühlmittelverlust-Störfall schießt Dampf mit hohem Druck in das eigentliche Containment (hellgelb) und die Containment-Atmosphäre wird durch die Kondensationsrohre in die Kondensationskammer (hellblau) gedrückt (Blaue Pfeile).

Der Druck in der Kondensationskammer steigt. Das Wasser (dunkelblau) fliegt zunächst hoch und fällt zurück. Jetzt strömt Dampf nach und wird im Wasser kondensiert (rote Pfeile). Dadurch wird der Druckaufbau begrenzt.



Nach einer Weile sinkt infolge von Kondensation der Druck im Drywell und durch Rückschlagklappen strömt die nicht-kondensierbare Gasatmosphäre in den Drywell zurück. (gestrichelte blaue Pfeile)

In Fukushima liegt kein Kühlmittelverlust-Störfall vor.

Man fragt sich natürlich, warum die Konstrukteure des Reaktors nicht einfach einen großen zylindrischen oder kugelförmigen Behälter aus Stahl oder Beton um den Reaktor herumgebaut haben, der groß und druckfest genug ist, um den Druckaufbau bei einem Kühlmittel-Verlust-Störfall aufzufangen. Die Antwort ist einfach: Ein solches einfacheres Containment wäre sehr viel teurer geworden als diese komplizierte Konstruktion. Das Unglück in Fukushima beantwortet auch die Frage, ob diese preiswertere Konstruktion genauso gut ist wie die einfache aber teurere Lösung. Die Antwort ist ein klares Nein; die Containments der Blöcke 1 bis 3 wurden im Störfall undicht und lecken so stark, dass der Betreiber TEPCO den Versuch, die Containments bis zu den RDBs mit Wasser aufzufüllen, aufgeben musste.

Ein großes Manko eines Atomkraftwerks ist es, dass man es nicht so einfach wie einen Automotor abstellen kann. Die eigentliche Kernreaktion lässt sich zwar schlagartig mit den Steuerstäben abschalten, aber die Brennelemente erzeugen noch jahrelang die sogenannte Nachzerfallswärme, die direkt nach dem Abschalten mehrere MW beträgt und dann in Laufe von Jahren auf Null geht. Das erste Jahr zumindest müssen die Brennelemente mit Wasser gekühlt werden.

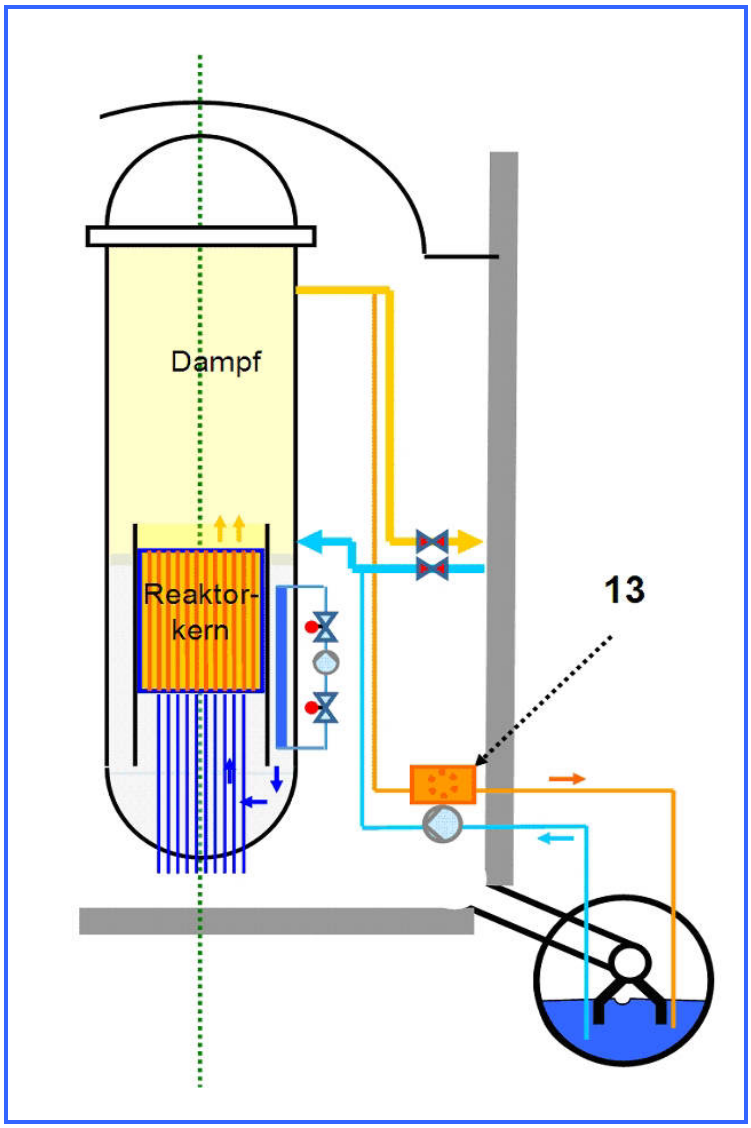
Dazu hat der Reaktor ein unabhängige Nach- und Notkühlsysteme (Emergency Core Cooling System ECCS), das nach Abschalten den Kern kühlt und auch im Notfall zur Notkühlung des Kerns eingesetzt werden kann. Die Reaktoren in Fukushima als Oldtimer verfügten nur über zwei unabhängige Stränge oder nicht wie bei neueren Reaktoren üblich über vier Stränge.

Das Not- und Nachkühlsystem (Emergency Core Cooling System ECCS) besteht aus einem Hockdruck-Einspeisesytem (High Pressure Coolant Injection HPCI) und dem Niederdruck-Einspeisesystem (Low Pressure Coolant Injection System LPCI). Die Aufgabe des Hochdruck-Einspeisesystems HPCI ist nur kurzfristig und zwar muss, wenn über die Abblaseleitung abgeblasen wird, aber der Druck noch hoch ist, bereits Kühlwasser ergänzt werden. Dazu benutzt man dieses System und zwar solange, bis der Druck so niedrig ist, dass das Niederdruck-Einspeisesystem LPCI einspeisen kann.

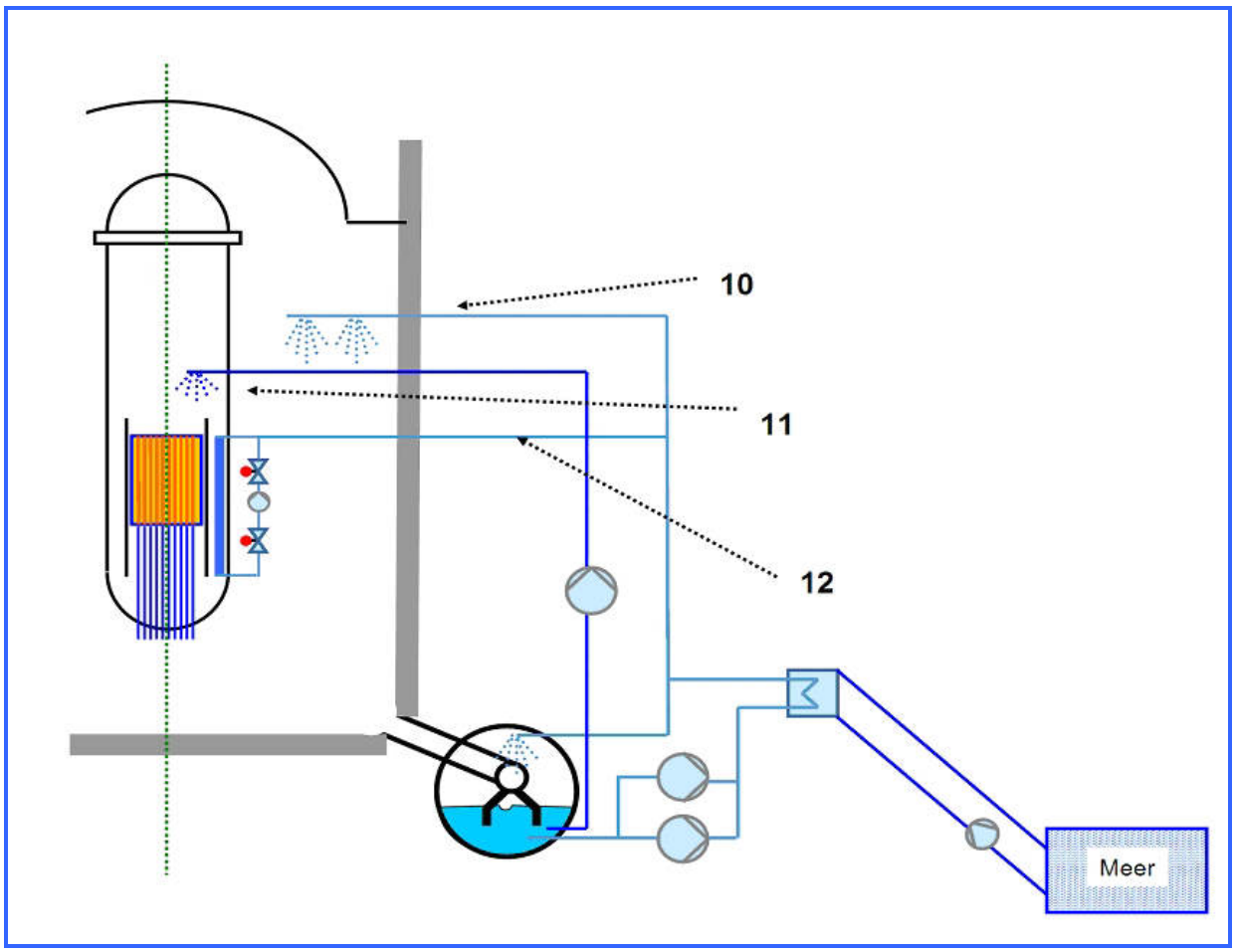
Der Hauptzwecke ist aber betrieblich, um den Kern schonend abzukühlen. Deshalb wird dieses System so geregelt, dass es nur arbeitet, wenn es unbedingt nötig ist. Sonst wird es von der Regelung, die sich am Füllstand im RDB orientiert, abgeschaltet. Im Störfall, wenn es um alles oder nichts geht, sollte man entschlossen abblasen, um den Druck wegzubringen und auch mögliche Schäden an den Hüllrohren in Kauf nehmen. Dann ist der Reaktor zwar irreparabel beschädigt und kann nicht wieder in Betrieb genommen werden, aber man ist mit der Kühlung auf der sicheren Seite. IN fukushima war aber nicht vorgesehen, die Regelung bei Bedarf abzuschalten.

Das Hochdruckeinspeisesystem HPCI wird nicht mit einer elektrischen Pumpe betrieben sondern mit einer Dampfturbine und ist somit besonders zuverlässig. Dazu wird ein Ventil geöffnet und Dampf strömt durch eine Leitung vom RDB Dampfraum in die Kondensationskammer und treibt dabei eine Turbine (13). Diese Turbine treibt die Pumpe des Systems an, die also immer läuft, solange Dampf aus dem RDB in die Kondensationskammer strömt. Erst wenn das Wasser in der Kondensationskammer sich so aufgeheizt hat, dass der Dampf nicht mehr kondensiert, bleibt die Pumpe ste-

hen. Es handelt sich also um ein passives Sicherheitssystem; elektrische Energie wird nur zur Steuerung der Ventile des Systems benötigt. Das Bild zeigt die Schaltung.



Bei einem Ausfall der Stromversorgung kann dieses System mit Hilfe von Notstrom aus der Batterie betrieben werden. In den Blöcken 1 bis 3 war dieses System je einmal vorhanden.



Das Niederdruck-Notkühlsystem (Low Pressure Coolant Injection = hellblau), welches Wasser aus der Wasservorlage der Kondensationskammer abzieht, es kühlt und dann sowohl anstelle des Speisewassers in den RDB (12) als auch in das Containment-Sprühsystem (10) einspeist. Dieses Sprühsystem senkt den Druck im Containment und in der Kondensationskammer ab und kühlt den RDB von außen.

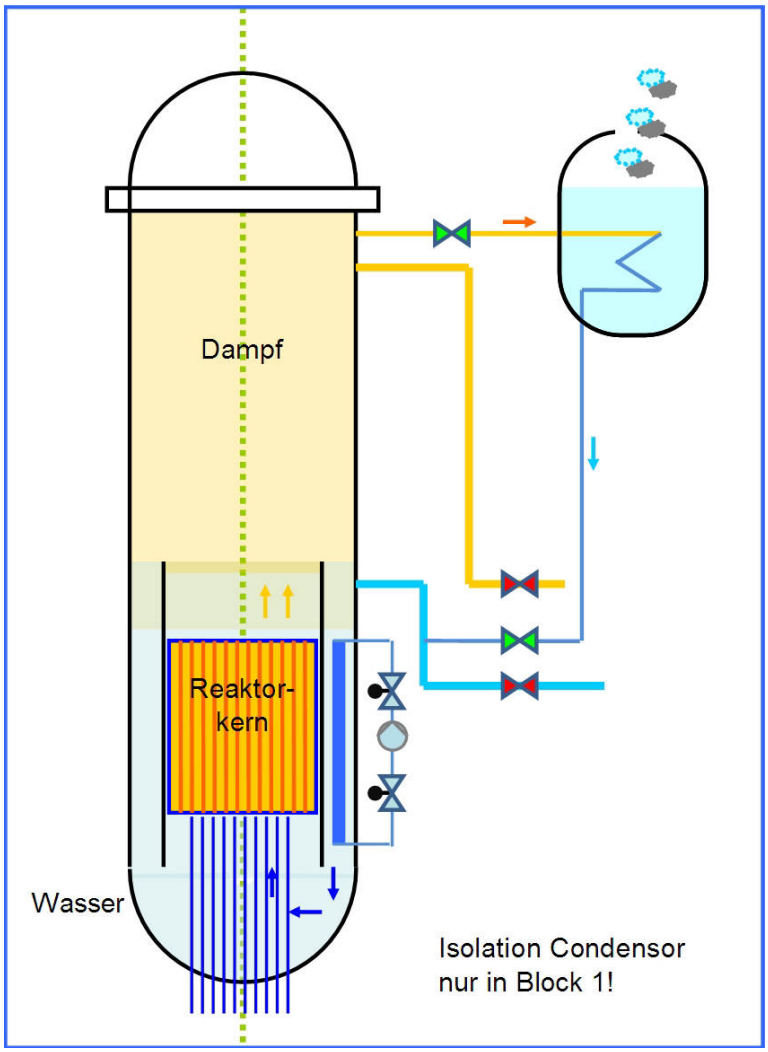
Das Kernsprühsystem (dunkelblau) (11) befindet sich im RDB und sprüht zur Kühlung direkt von oben auf den Kern. Das verwendete Wasser wird langfristig über das Nebenkühlwasser, also die Kühlung mit Meerwasser über einen Wärmetauscher, gekühlt. Kurzfristig geht es auch ohne, bis das Wasser in der Kondensationskammer aufgeheizt ist.

Das System ist zweifach vorhanden, die Pumpen sogar viermal. Ohne Strom funktioniert es aber nicht. Deshalb ist es bei einem Störfall mit totalem Stromausfall wichtig, so schnell wie möglich, externe Generatoren anzuschließen und das System wieder in Betrieb zu nehmen. In Fukushima fielen diese Systeme nicht nur durch den Ausfall der

Notstromdiesel sondern auch durch die Zerstörung der Einlaufbauwerke. Dadurch fiel die Meerwasserkühlung aus.

Die Konstrukteure des Reaktors haben die starke Abhängigkeit der Kühlung von der Verfügbarkeit von Strom auch gesehen und zur Sicherheit noch zusätzliche Sicherheitssysteme eingebaut, die ohne Strom auskommen und mit denen man die Zeit, bis die Stromversorgung wieder hergestellt ist, überbrücken kann.

Der Block 1 verfügt über einen sog. „Containment Isolation Condensor“ (IC), das ist ein Tank voll Wasser mit einem Wärmetauscher, der mit dem RDB oben und unten verbunden ist. Das Funktionsprinzip ist einfach: Dampf aus dem RDB strömt zum Wärmetauscher und heizt das Wasser im Tank auf, das verdampft und entweicht in die Umgebung über den Kamin. Das Wasser wird dabei höchstens 100°C warm, dann verdampft es. Der Dampf aus dem RDB ist viel heißer und steht unter höherem Druck und kondensiert deshalb bei höheren Temperaturen. Der kondensierte Dampf fließt dann infolge der Schwerkraft nach unten in den unteren Teil des RBD. Das Ganze ist eine passive und damit eigentlich eine narrensichere Konstruktion, wenn der Dampf ungehindert strömen kann, das heißt, wenn die Ventile in den Leitungen offen stehen. Ob es wirklich so narrensicher ist, wie die Propagandisten der passiven Sicherheitssystem immer behaupten, beantwortet ebenfalls der Störfall in Fukushima: Die Ventile waren zumindest teilweise offen und trotzdem hat das System nicht funktioniert. Dieses System ist zweimal in Block 1 vorhanden.



In den Blöcken 2 und 3 war statt des IC-Systems das "Reactor Core Isolation Cooling System" (RCIC) eingebaut worden, das Strom nur für die Schaltvorgänge benötigt. Falls die Speisewasserversorgung ausfällt, wird das RCIC System zugeschaltet und es ist genauso aufgebaut wie das Hochdruck-Einspeisesystem (siehe Schaltbild weiter oben). Es pumpt Wasser aus der Wasservorlage der Kondensationskammer in den RDB. Das Besondere an der Pumpe ist, dass sie von einer Dampfturbine (13) angetrieben wird, die ihrerseits dadurch angetrieben wird, dass Dampf aus dem RDB über die Turbine in die Wasservorlage der Kondensationskammer geleitet wird. Das System funktioniert aber nur, solange das Wasser in der Kondensationskammer nicht zu heiß wird, um den Dampf effektiv zu kondensieren bzw. bis das Containment durch Überdruck versagt oder eine kontrollierte Druckentlastung durchgeführt wird. Das RCIC ist in Block 2 und 3 je einmal vorhanden.

Ohne externe Wärmesenke funktioniert das IC und das RCIC nur begrenzte Zeit, aber man kauft sich Zeit, in der man eine mobile externe Stromversorgung anschließen kann, also z.B. Generatoren die auf Lastwagen moniert sind.

Ein weiteres im wesentlichen passives Sicherheitssystem ist das System zur Druckentlastung des RDB, mit dem man sowohl im Betrieb als auch im Störfall verhindern kann, dass der RDB zu hohen Drücken ausgesetzt wird. Eine Druckentlastung des RDB kann durch das automatische Druckentlastungssystem durchgeführt werden. Dabei wird Dampf aus der Frischdampfleitung über das Abblaseventil in die Wasservorlage der Kondensationskammer abgeblasen, wo der Dampf kondensiert. Das funktioniert aber nur solange das Wasser in der Kondensationskammer nicht zu heiß wird, also ohne externe Kühlung nur eine begrenzte Zeit. Wenn dieses Ventil sich bedienen lässt, kann man mit der sogenannten "feed and bleed"-Prozedur (= einspeisen und abblasen) versuchen,, den Kern zu kühlen. Es gibt diverse Möglichkeiten, Wasser in den RDB einzuspeisen, vorausgesetzt es stehen die entsprechenden Pumpen und Wasservorräte zur Verfügung. Hierzu reicht Strom aus der Batterie.

Eine wichtige Rolle in der Sicherheitsphilosophie moderner Atomkraftwerke spielt die sog. „Vermeidung des Hochdruckpfades“, d.h. die Möglichkeit den Druck und damit die Temperatur im Reaktor im Falle eines Schweren Störfalls so schnell wie möglich abzusenken. Diese Maßnahme ist zweischneidig. Wird der Druck zu schnell abgesenkt, drohen massive Hüllrohrschäden und damit unkontrollierte Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten in das Reaktordruckgefäß. Also sollte man dies nur machen, wenn man sicher ist, dass ein Schwerer Störfall vorliegt. Bei betrieblichen Bedingungen – also ohne Störfall – muss man in der Lage sein, die Abblaseventile kontrolliert zu öffnen und zu schließen. Die Konstrukteure hatten darüber intensiv nachgedacht und um sicher zustellen, dass dies auch dann noch zuverlässig funktioniert, wenn nur noch Strom aus Batterien zur Verfügung steht, wurden diese Ventil mit Druck aus Stickstofftanks geöffnet und geschlossen. So wurde auch beim Störfall vorgegangen, bis die Stickstofftanks leer waren. Das hatten sich die Ingenieure seinerzeit nicht vorstellen können, dass der Reaktor solange außer Kontrolle ist – genauso wie heute, wo die Betreiber behaupten, dass spätestens nach 24 Stunden die Operateure die Anlage in einen sicheren Zustand bringen und deshalb nicht mehr Batterien oder größere Druckspeicher erforderlich sind.

Nach dem schweren Störfall in Three Mile Island im Jahre 1979 erkannten die Reaktorsicherheitsexperten, dass man zwei Risiken nämlich den totalen Ausfall der Stromversorgung und die Wasserstoffbildung unterschätzt hatte und es wurde weltweit nachgerüstet.

Alle Reaktoren, die noch nicht über Notstromdiesel verfügten, wurden nachgerüstet. Notstromdiesel sind riesige Stromgeneratoren mit Dieselantrieb, wobei modifizierte Schiffsdiesel zum Einsatz kommen. Die Nachrüstung ist aufwendig und teuer und zieht erhebliche Folgekosten nach sich, da die Notstromdiesel natürlich regelmäßig getestet und gewartet werden müssen. In den Blöcken 1 bis 5 wurden je zwei unabhängige aber räumlich nicht getrennte Notstromdiesel eingebaut und zwar praktischerweise gleich neben den Stromumformern und -verteilern in den Kellerräumen der Turbinengebäude. Nur in Block 6 ließen sich die Notstromdiesel dort nicht installieren. Deshalb wurden die Notstromdiesel für den Block 6 oben auf dem Hang hinter dem Block in einem eigenen Gebäude untergebracht. Irgendwann gab es dann mal einen Leitungsbruch in den Kellerräumen eines Turbinenhauses und die Notstromdiesel standen unter Wasser. Das störte aber nicht weiter, da sie zu diesem Zeitpunkt nicht benötigt wurden. Ein paar Ingenieure haben daraufhin den Aufstellungsort kritisiert, die hat man dann in bewährter Manier gleich woandershin versetzt und nichts hat sich geändert.

Die Installation der Notstromdiesel und der Verteilerschränke im Keller des Turbinenhauses ist als ein schwerwiegender Design-Fehler (Design-Fehler 2).

Das zweite Problem, das man nach dem Unglück in Three Mile Island anging, war die Wasserstoffproblematik. Bei einem schweren Störfall, bei dem die Brennstäbe schmelzen, kann es bei hohen Temperaturen zur Zirkon-Wasserdampf-Reaktion kommen. Bei dieser Reaktion stiehlt das Zirkon der Hüllrohre dem Wasserdampf die Sauerstoffatome regelrecht weg, um damit Zirkonoxyd zu bilden. Zurück bleibt dann statt Wasserdampf nur Wasserstoffgas. Befindet sich im Containment normale Luft, dann bildet sich Knallgas, das zu heftigen Explosionen führen kann. Um dem vorzubeugen hat man das Containment nicht mit Luft sondern mit reinem Stickstoff gefüllt („inertisiert“) und so die Gefahr - zumindest für das Containment - gebannt oder man glaubte es zumindest.

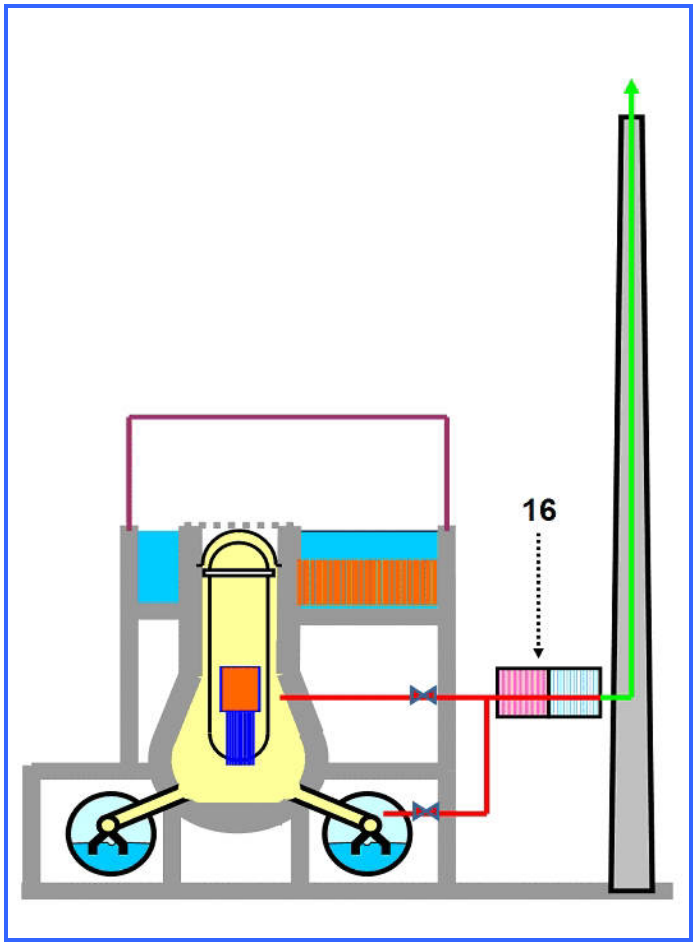
Die Wasserstoffbildung hat in einem Reaktor wie in Fukushima einen zweiten Effekt. Wenn das neu gebildete Wasserstoffgas über die Abblaseleitung in die Kondensationskammer geleitet wird, kondensiert es dort nicht sondern bleibt als Gas erhalten und

der Druck im Containment steigt und steigt. Um ein Überdruckversagen des Containments zu verhindern, wurde deshalb ein System zur kontrollierten Druckentlastung des Containments nachgerüstet. (Controlled Containment Venting) Damit besteht die Möglichkeit, den Druck im Containment gezielt abzusenken und die Containmentatmosphäre gefiltert in die Umwelt abzugeben. Das Druckentlastungssystem ist sowohl an die Birne des Containments als auch an den Torus des Wetwell angeschlossen. Beide können getrennt entlastet werden. Leider fehlte in Fukushima ein Filtersystem zur Zurückhaltung von Jod und Aerosolen. Solche Filter sind sehr effektiv, Rückhaltung bis zu 99,99%. Solche Filter hätten sehr geholfen, die radioaktive Freisetzung zu verringern.

Der Einbau von Filtern ist eigentlich kein Problem. Sie werden außerhalb des Reaktorgebäudes vor dem Abluftkamin installiert (16). Sie sind auch nicht besonders groß.

Es ist als ein schwerwiegender Design-Fehler, dass in das System für kontrollierte Druckentlastung des Containments keine Jod- und Aerosolfilter eingebaut wurden (siehe Design-Fehler 4).

Die kontrollierte Druckentlastung ist in jedem Fall einer unkontrollierten Leckage vorzuziehen.



Nicht nur im Reaktorkern sondern auch im Abklingbecken wird langfristig Wärme erzeugt, die abgeführt werden muss, auch wenn der Reaktor abgeschaltet ist. Da die Abklingbecken sehr viel Wasser enthalten und vergleichsweise wenig Wärme erzeugen, hat die Kühlung der Abklingbecken einige Tage Zeit. Man kann sich bei einem schweren Störfall später darum kümmern, wenn man die Kühlung des Reaktors im Griff hat.

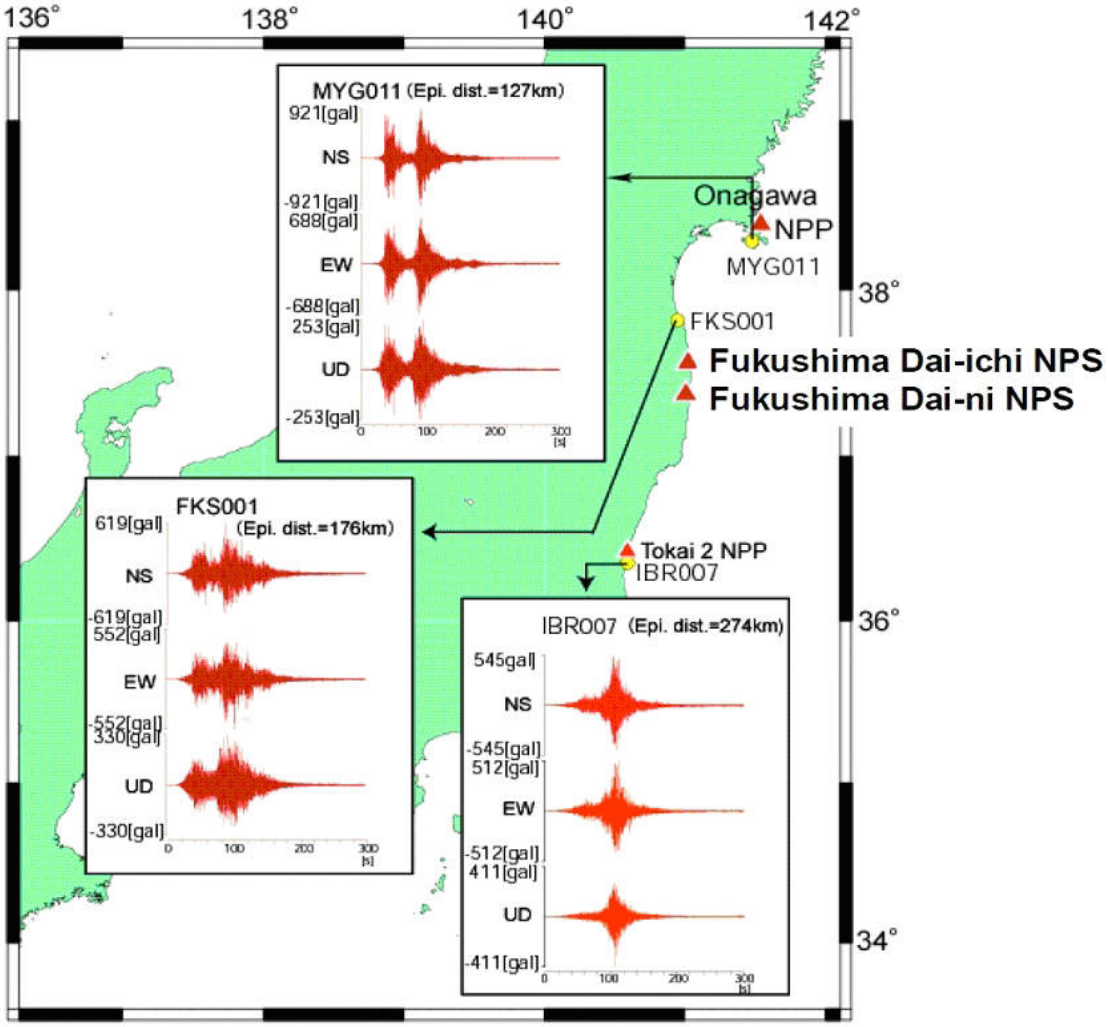
Im Fall eines totalen Stromausfalls oder eines Verlusts der Kühlmittelzufuhr war der Plan, dass die Mannschaft die Notversorgung mit mobilen Generatoren herstellt und mit mobilen Pumpen Kühlwasser einspeist. Wenn dies schnell genug geschieht, kann man so eine Kernschmelze verhindern. Solange keine Kernschmelze eintritt, ist die Radioaktivität noch sicher in den Brennelementen eingeschlossen, das Reaktorgebäude und die Umgebung sind noch nicht radioaktiv verseucht: Man kann noch überall arbeiten und Handmaßnahmen durchführen. Erst nach Beginn der Freisetzung der Radioaktivität ändert sich die Lage schlagartig, weil dann die Strahlenbelastung selbst einfachste Maßnahmen verhindert. Deshalb war für diesen Fall vorgesorgt und es gab Notfallpläne und mobile Geräte.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die vier Blöcke besser als viele andere Atomkraftwerke für einen totalen Stromausfall und den damit verbundenen Ausfall der Kühlmittelversorgung gerüstet waren und die Mannschaft viele Möglichkeiten hatte, um eine drohende Kernschmelze herauszuzögern und - nach menschlichem Ermessen - auch ausreichend Zeit, um die Stromversorgung und Kühlmittelversorgung durch mobile Geräte wieder herzustellen, bevor es zu einem massiven Kernschmelzen kommt. Hier ist kein Designfehler zu erkennen.

3 Das Erdbeben

Am 11. März 2011 um 14:46 ereignete sich im Meer vor Fukushima ein großes Erdbeben der Stärke 9, das größte Erdbeben, das jemals in Japan in historischen Zeiten beobachtet wurde (Bezeichnung: Tohoku - Chihou - Taiheiyo - Oki - Earthquake)

Das Erdbeben traf nicht nur die 6 Reaktoren in Fukushima Daichi, sondern alle Atomanlagen an der Ostküste stark, am stärksten war die Anlage in Onagawa betroffen. Das Bild zeigt die gemessenen Beschleunigungen. Die Beschleunigungen an den Atomkraftwerken lagen im Bereich der Auslegung. Es war also kein Erdbeben einer Stärke, die über die Auslegung der Anlagen hinausgegangen wäre, und dem entsprechend gut haben die Anlagen auch das Erdbeben überstanden.



Im Grunde ist es so, dass bei einem Erdbeben die Anlage etwa eine Minute lang kräftig wackelt. Man kann jedes Atomkraftwerk so bauen, dass es bei einem Erdbeben keinen Schaden nimmt. Dazu müssen zwei Dinge beachtet werden:

1) Der Baugrund muss geeignet sein und keine Bruchlinien aufweisen: also nicht auf eine alte Erdbebenspalte bauen oder in einer Gegend, wo es nur so von Bruchlinien wimmelt. Der Baugrund sollte auch ordentlich tragfähig sein.

2) Die Bauausführung muss solide sein: das Gebäude aus Stahlbeton mit genug Eisen, das auch tatsächlich eingebaut wird und nicht wie beim U-Bahnbau in Köln an Schrotthändler weiter verhökert wird. Alle Komponenten müssen fest verankert sein oder mit Stoßbremsen und Dämpfern gegen Schwingungen gesichert.

Wenn man diese einfachen Regeln befolgt, kann nicht viel schief gehen. In Japan gab es mehrere Fälle, in denen ältere Atomkraftwerke ohne Probleme Erdbeben überstanden, die über die Auslegung hinausgingen. Der Grund dafür ist die dynamische Auslegung und die hohe Qualität der Bauausführung, die bei einem Atomkraftwerk ganz anders überwacht wird als bei zivilen Gebäuden oder bei der Kölner U-Bahn.

Da Erdbeben im Fernsehen sehr spektakulär aussehen, denken viele Menschen, dass Erdbeben eine besonders große Gefahr für Atomkraftwerke darstellen, aber das entspricht nicht den Tatsachen. Bis heute gibt es keinen größeren Schadensfall in Atomkraftwerken aufgrund von Erdbeben.

Die japanischen Reaktoren sind gegen schwere Erdbeben ausgelegt und mit einer Regelung ausgerüstet, dass sie sich bei einem schweren Erdbeben automatisch abschalten. Der Ablauf dabei ist, dass eine Schnellabschaltung über die Steuerstäbe erfolgt, die Turbine die Last abwirft und die Anlage auf den Nachkühlbetrieb umgeschaltet wird. Den dazu benötigten Strom entnimmt man üblicherweise aus dem Stromnetz. Damit das gut funktioniert, waren die Reaktoren an drei verschiedene Hochspannungsnetze angeschlossen, aber alle drei fielen durch das Erdbeben aus, was eigentlich keine Überraschung bei einem Erdbeben dieser Größenordnung ist.

Es gilt als großer Vorteil in der Reaktorsicherheit, Atomanlagen mit mehr als einem Reaktor an einem Standort zu bauen, weil man bei Ausfall der Stromversorgung aus dem Netz den betroffenen Reaktor mit Strom aus dem Nachbarreaktor versorgen kann. Soweit die Theorie, aber bei einem Erdbeben schalten sich alle Reaktoren der Anlage automatisch ab und dann ist dies nicht möglich.

Als letzte Möglichkeit verfügten die Reaktoren in Fukushima über Notstromdiesel, die auch problemlos ansprangen und die Nachkühlpumpen mit Strom versorgten**.** Die Mannschaft prüfte die Lage und, da sie keine Probleme entdeckte, startete sie den üblichen Nachkühlbetrieb und fuhr die Anlage schonend mit 50K/h ab, d.h. es würde mehrere Stunden dauern, bis man den kalten Zustand erreicht hat. Es war auch keine Eile geboten, da alle Systeme das Erdbeben ohne Fehlermeldung überstanden hatten, und die Mannschaft keinerlei Information über das Ausmaß der Katastrophe außerhalb der Anlage hatte. Wahrscheinlich gingen sie davon aus, dass ein paar Stunden später das Netz wieder verfügbar ist und sie wieder ans Netz gehen würden. Es war ja schließlich nicht das erste Erdbeben, das sie problemlos überstanden!

Im nachhinein ist man bekanntlich immer schlauer und es ist zu vermuten, dass die von der Auslegung her gegen das Grundwasser dichten Kellerräume der Reaktoren und des Turbinenhauses Risse bekommen haben und nach dem Erdbeben nicht mehr dicht waren. Das lässt sich natürlich nicht von der Warte aus prüfen und hat zunächst auch keine unmittelbare Auswirkung.

Wahrscheinlich haben die Leute auf der Warte nach dem ersten Schrecken ein paar Techniker losgeschickt, um überall mal nach dem rechten zu sehen und erwarteten deren Rückmeldungen und - als Japaner mit Erdbeben und Tsunamis vertraut - auch einen möglichen nachfolgenden Tsunami.

Bis heute ist eines der größten Probleme bei der Begrenzung der Folgen des Störfalls die Tatsache, dass Grundwasser in erheblichem Umfang durch Risse und undichte Durchführungen in die Kellerräume der vier Reaktoren eindringt. Solche undichte Stellen würden im Normalbetrieb nicht auffallen, da der Grundwasserspiegel unter die Kellersohle der Kraftwerke abgesenkt wird. Die veröffentlichten Schadensbilder von undichten Stellen deuten aber daraufhin, dass diese Schäden auf das Erdbeben zurückzuführen sind. Für sich alleine gesehen, sind diese undichten Stellen kein Fehler oder Mangel. Nach der Kernschmelze und den Explosionen jedoch erschweren sie die notwendige externe Kühlung.

4 Der Tsunami

Seitdem verheerende Weihnachts-Tsunami von 2004 ist das Phänomen Tsunami und seine Auswirkungen den meisten Menschen geläufig. Auslöser von Tsunamis sind Erdbeben oder riesige Erdrutsche im Meer, bei denen schlagartig der Meeresboden sich verändert und dabei das gesamte darüber befindliche Wasser in Bewegung setzt. Dies löst eine Welle aus, an der sich das gesamte im Meer befindliche Wasser beteiligt. Diese Welle rast mit mehreren 100 Stundenkilometern als relativ flache Welle durch das Meer, bis sie auf Land trifft. Dort bildet sie eine Wasserwand, die das Ufer hinauf und über das Land rast, bis sie zum Stehen kommt.

Das Erdbeben löste eine solche Tsunami-Welle aus und diese traf um 15:38 auf die Anlagen Fukushima Daichi, Fukushima Daini und Onagawa. Auf alle drei Anlagen traf die Welle und überflutete das Gelände um die Reaktoren herum. Das Ergebnis war aber unterschiedlich. Die Reaktoren in Fukushima Daini waren noch am Netz und wurden mit Netzstrom versorgt. Die drei Reaktoren in Onagawa wurden von ihren Notstromdieseln versorgt, die sich in Gebäuden oben am Hang oberhalb des Tsunamis befanden. Bei beiden Anlagen kam es infolge des Tsunamis zu keiner Unterbrechung des Nachkühlbetriebs.

Ganz anders in Fukushima Daichi. Das Bild zeigt, wie die Tsunamiwelle auf die Anlage trifft.

Ein ähnliches Bild muss man sich auch bei den anderen Anlagen vorstellen. Der große Unterschied war, dass die Flutwelle in Fukushima sich hinter der Anlage aufstaute, wie man schön auf dem Bild mit den brodelnden Wassermassen sieht und die Kellerräume der Turbinengebäude flutete, wo sich die Notstromdiesel und die Stromverteileranlagen befanden.

Die Notstromdiesel der Blöcke 1 bis 5 fielen sofort aus und damit auch die Nachkühlung. Nur der Notstromdiesel des Block 6 oben auf dem Hang tuckerte weiter. Da Block 5 und Block 6 zur Revision abgeschaltet waren, benötigten sie nicht soviel Strom und es gelang nach kurzer Zeit der Mannschaft vor Ort, mit einer mobilen Stromleitung den Block 5 mit Strom aus dem Notstromdiesel von Block 6 zu versorgen.

Damit waren bis die Blöcke 1 bis 4 alle anderen vom Tsunami betroffenen Blöcke erst einmal sicher. Die Blöcke 1 bis 4 dagegen erlebten einen Alptraum, denn innerhalb kürzester Zeit und ohne ein Versagen der Mannschaft war die komplette Sicherheitskette ausgefallen. Alle aktiven Sicherheitssysteme standen nicht mehr zur Verfügung und die Reaktoren würden in einen schweren Störfall mit Kernschmelze und massiver radioaktiver Freisetzung laufen, wenn es nicht gelingen würde, innerhalb der nächsten 8 Stunden die Stromversorgung wiederherzustellen.

Wie konnte es dazu kommen, dass bei dem Bau der Anlage von einer viel zu niedrigen "maximalen Tsunami-Höhe" ausgegangen wurde? Die "maximale Tsunami-Höhe" wird von Experten des Betreibers im Bauantrag ermittelt und von der Genehmigungsbehörde akzeptiert und wird so Grundlage für die Konstruktion der Anlage.

Wie berechnet nun ein "Experte" die "maximale Tsunamihöhe". Ein Tsunami besteht aus drei Elementen:

1) Das Erdbeben oder der Erdrutsch, dieser ist ein zufälliges Ereignis und kann eigentlich überhaupt nicht deterministisch vorhergesagt werden, mit einem Wort: man kennt weder die Größe noch die Ausbreitungsrichtung zuverlässig.
2) Die Ausbreitung im offenen Meer. Dieser Teilaspekt ist völlig verstanden.
3) Die Auswirkung des Tsunami an der Küste. Dieser Aspekt ist auch relativ gut verstanden, zumindest so gut, dass man aus der Höhe der ankommenden Tsunami-Welle die Auswirkungen an Land abschätzen kann und auch sinnvolle Maßnahmen zum Schutz durchführen kann, wie z.B. geeignete Schutzwälle oder keine Bauten in kritischen Gebieten.

Das Unwissen über das mögliche auslösende Ereignis versucht man mit probabilistischen Methoden zu reduzieren. Dazu verwendet man die Methoden der Erdbebenforschung und überträgt deren Modelle auf den Tsunami. Das Problem ist nur, dass es sehr viele Erdbeben und damit eine gute Statistik zu Erdbeben gibt. Tsunamis dagegen sind vergleichsweise selten.

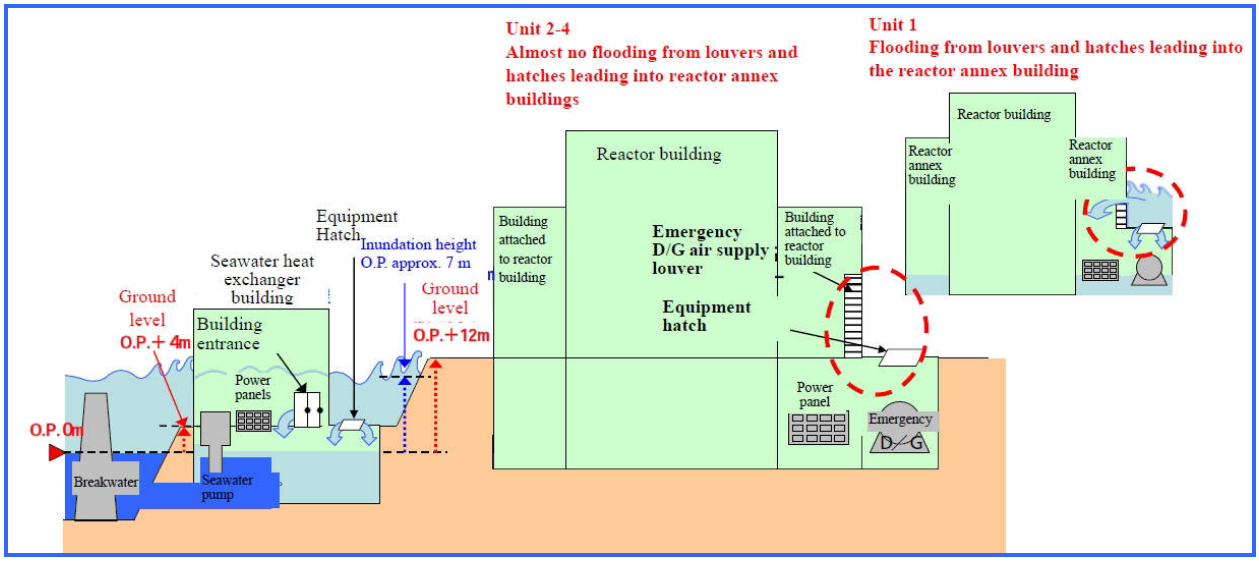
Am häufigsten treten sie in Japan auf; dort haben sich in den letzten 100 Jahren ca. 150 Tsunamis ereignet, wobei nur bei 25 Tsunamis Menschen zu Schaden kamen. Damit ist die Datenbasis viel zu dürftig, um daraus verlässliche empirische Korrelationen abzuleiten. Außerdem ist völlig unklar, wie die Verteilung aussieht und es macht einen riesigen Unterschied bei seltenen Ereignissen, ob sie normal verteilt oder logarithmisch verteilt sind, was in guten Statistik-Vorlesungen demonstriert wird.

Jeder kann sich leicht in Bild machen, wie windig die Tsunami-Auslegung von Atomkraftwerken ist. Im Internet findet sich eine Musteranalyse zum Atomkraftwerk Diabolo Canyon: http://peer.berkeley.edu/tsunami/wp-content/uploads/2010/09/PGE_tsunami_Apr2010.pdf

Die Anlage Fukushima Daichi war nach dem Tsunami-Berechnungsverfahren der japanischen Society of Civil Engineers ausgelegt, das eine maximale Tsunami-Höhe von 6 m ergab. Der Tsunami in Fukushima erreichte aber mindestens 13 m. Damit erübrigt sich jede Diskussion darüber, was von den japanischen "Experten" und ihrem Berechnungsverfahren zu halten ist.
Es ist Aufgabe der Genehmigungsbehörde, sich mit fremdem und eigenem Sachverstand eine eigene Meinung zu bilden und zu überprüfen, dass im Bauantrag von korrekten Auslegungswerten ausgegangen wird. Wenn die Behörde keine Ahnung hat, wie groß diese Werte sein müssen, z.B. weil sie keinen eigenen Sachverstand hat, um die "maximale Tsunami-Höhe" zuverlässig abzuschätzen, dann kann sie schlicht und einfach die Anlage nicht genehmigen und muss den Antragsteller zwingen, den Stand von Wissenschaft und Technik vor der Genehmigung so weit zu entwickeln, dass zuverlässige Abschätzungen möglich sind.

Es ist ein schwerwiegender Fehler der Genehmigungsbehörde den Reaktor zu genehmigen, ohne in der Lage zu sein, zuverlässig die "maximalen Tsunami-Höhen" abzuschätzen. (Genehmigungsfehler Nr. 1)

Im japanischen Interim-Report findet sich dieses Bild, das zeigt das das Wasser durch die Bodenöffnungen bzw. durch die Lüftungsöffnungen für die Luftzufuhr der Notstromdiesel, die sich in Bodennähe befinden, in die Kellerräume eingedrungen ist.



Sollte das Bild zutreffend sein und diese Öffnungen sich tatsächlich - wie auf der Skizze dargestellt - in Bodennähe befunden haben und nicht wasserdicht verschlossen gewesen sein, dann ist das ein schwerwiegender Fehler bei der Genehmigung.

Selbst wenn man in der Lage ist, die Tsunami-Höhe zuverlässig abzuschätzen, ist es ein Gebot des gesunden Menschenverstandes, die Reaktorgebäude so zu bauen, dass, wenn es zu einer Überflutung des Geländes kommt - wie auch immer - nicht gleich das Wasser in die Gebäude eindringt. Mit dem Steilhang hinter den Gebäuden kann man sich auch andere Formen der Überflutung vorstellen, z.B. Platzregen, Schlammlawinen, Erdrutsche. Das wurde aber alles im Genehmigungsverfahren nicht bedacht, da man absolutes Vertrauen in die Ermittlung der "maximalen Tsunami-Höhen hatte.

Es ist ein schwerwiegender Genehmigungsfehler, dass die Gebäude im unteren Teil der Anlage nicht gegen kurzfristige Überflutung durch Wasser oder Schlamm ausreichend gesichert waren. (Genehmigungsfehler Nr.2)

Um es noch einmal ganz klar zu sagen: Der Antragsteller kann beantragen, was er will. Es ist die Aufgabe der Genehmigungsbehörde, dafür zu sorgen, dass die Anlage "sicher" ist und dem Antragsteller die Genehmigung zu verweigern, wenn dies nicht der Fall ist. Soweit die Theorie: Im wahren Leben wird die Leitung der Genehmigungsbehörde politisch besetzt mit "Weicheiern" ohne Rückrat. Was dabei herauskommt, kann man in Fukushima besichtigen.

Überflutungen durch äußere Überschwemmungen oder aus internen Ursachen wie Leitungsbruch gehören zu den Störfällen, die bei der Auslegung eines Atomkraftwerkes berücksichtigt werden (internal flooding, external flooding). Bei internen Überschwemmungen muss man abpumpen: Entweder über das interne Drainage-System oder mit mobilen Pumpen. Durch den Tsunami sind ca. 1000 m^3 Meerwasser in die Kellerräume eingedrungen. Diese Wassermenge kann man mit mobilen Pumpen in 1 bis 2 Stunden abpumpen, zumal nach dem Tsunami nichts nach fließt. Da die Notstromdiesel schon eine Weile gelaufen waren, waren auch die Druckspeicher zum Neustart der Notstromdiesel wieder einsatzbereit. Nach dem Abpumpen hätte man zumindest versuchen könne, die Notstromdiesel neu zu starten. So wäre der Schwere Störfall leicht zu verhindern gewesen. Im Nachhinein ist man immer schlauer, aber in Fukushima fehlte es in dieser Situation an allem: mobilen Pumpen, auf ein solches Ereignis vorbereitete Mannschaft und eine entschlossene Führung.

5 Die Notfallvorbereitungen für den totalen Stromausfall

Der Ausfall aller Stromquellen einschließlich der Notstromdiesel wird in der Reaktorsicherheit mit "totaler Stromausfall" (= station black-out) bezeichnet. Nach dem Ausfall der Notstromdiesel standen als Energiequelle nur noch die Notstrombatterien zur Verfügung, das sind mehr oder weniger große Mengen von Autobatterien, die zusammengeschaltet sind und mehrere Räume füllen. Dieser Batteriestrom wird in erster Linie dazu benötigt, um die Messtechnik zu betreiben, um soweit wie noch möglich einen Überblick über den Zustand der Anlage zu behalten und ggf. sinnvoll Maßnahmen zu ergreifen.

Man muss sich die Lage der Betriebsmannschaft einmal vor Augen führen. Das Reaktorschutzsystem sagt der Mannschaft ja nicht um welchen Störfall aus dem Störfallkatalog es sich handelt sondern sendet eine Unzahl von Signalen und Meldungen, aus denen die Betriebsmannschaft dann erkennen muss, was abläuft. Ein totaler Stromausfall zündet einen wahren Weihnachtsbaum an Warnlampen auf der Warte und es ist wirklich schwer, den Durchblick zu behalten. Nur jemand, der in einem Störfallsimulator einen derartigen Störfall durchgespielt hat, kann nachvollziehen, welches Trommelfeuer an Informationen auf die Betriebsmannschaft einprasselt.

Da der Batteriestrom noch zur Verfügung steht, funktioniert auch das automatische Reaktorschutzsystem noch und es löst bei Überschreiten von Auslösewerten Aktionen der verschiedenen Systeme des Reaktors aus, die zum Teil wegen des fehlenden Stroms nicht erfolgreich sind, aber manchmal doch, was weitere Fehlermeldungen nach sich zieht.

Grundsätzlich gilt, dass zum Betrieb eines Kernkraftwerks große Mengen Strom benötigt werden. Mit den riesigen Notstromdieseln ist es nicht möglich, die Hauptkühlmittelpumpen zu betreiben sondern nur die kleineren Nachkühlpumpen. Mit dem Batteriestrom kann man nur sehr begrenzt kleine Pumpen betreiben und das auch nur für kurze Zeit. Dies ist jedoch keine gute Idee, es ist besser den Batteriestrom aufzusparen für die Messtechnik und das Betätigen von Ventilen. Viele Erfolg versprechende Notfall-Maßnahmen beruhen auf dem Prinzip des "feed and bleed" (= einspeisen und verdampfen), das das Öffnen und Schließen von Ventilen erfordert. Die großen Ventile er-

fordern soviel Strom, dass man sie am besten mit Batteriestrom nur öffnet oder schließt aber nicht mehrfach betätigt.

Eine wichtige Maßnahme im Störfall, ist es den Druck im RDB und im Containment abzusenken, da sonst kein Kühlwasser eingespeist werden kann. Die Betreiber von Fukushima hatten das bereits bedacht und haben bei der Nachrüstung der kontrollierten Druckentlastung des Containments Ventile mit Luftdrucksteuerung eingebaut, die die Druckluft aus einem Druckluftspeicher beziehen. So wurde erreicht, dass auch bei wenig Batteriestrom diese Ventile von der Warte aus noch geöffnet oder geschlossen werden konnten. Wenn der Drucklufttank leer ist, besteht auch noch die Möglichkeit, die Ventile von Hand zu öffnen oder zu schließen - vorausgesetzt der Strahlungspegel lässt das noch zu.

Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist der totale Stromausfall für die Anlagen in Fukushima noch nicht die totale Katastrophe, wenn es noch etwas Batteriestrom gibt und es der Mannschaft gelingt, damit in Block 1 das passive IC-System zu starten bzw. in Block 2 und Block 3 das passive RCIC-System zu starten und in Betreib zu halten. Solange diese passiven Systeme aufgrund der natürlich Kräfte bei der Kondensation in Betrieb bleiben und nicht von der Mannschaft oder der Leittechnik abgeschaltet werden, gewinnt man Zeit. Wenn in Fukushima alles gut gegangen wäre, hätte man 72 Stunden bis zum Eintritt der Kernschmelze zur Verfügung gehabt, wie es auch bei Block 2 der Fall war.

Diese Zeit steht der Mannschaft zur Verfügung, um an den vorhandenen Einspeisestutzen Feuerwehrautos anzuschließen, die mit Hilfe der Pumpe auf dem Auto und mit Schlauchverbindungen zu Tanks eine externe Einspeisung mit mobilem Gerät herstellen. Die externe Einspeisung ist dann in der Lage die Kernschmelze zu verhindern und den Kern langfristig zu kühlen: also kein großer Job, wenn man diese Maßnahme ordentlich vorbereitet hat und genug Gerät und trainierte Mannschaft zur Verfügung steht.

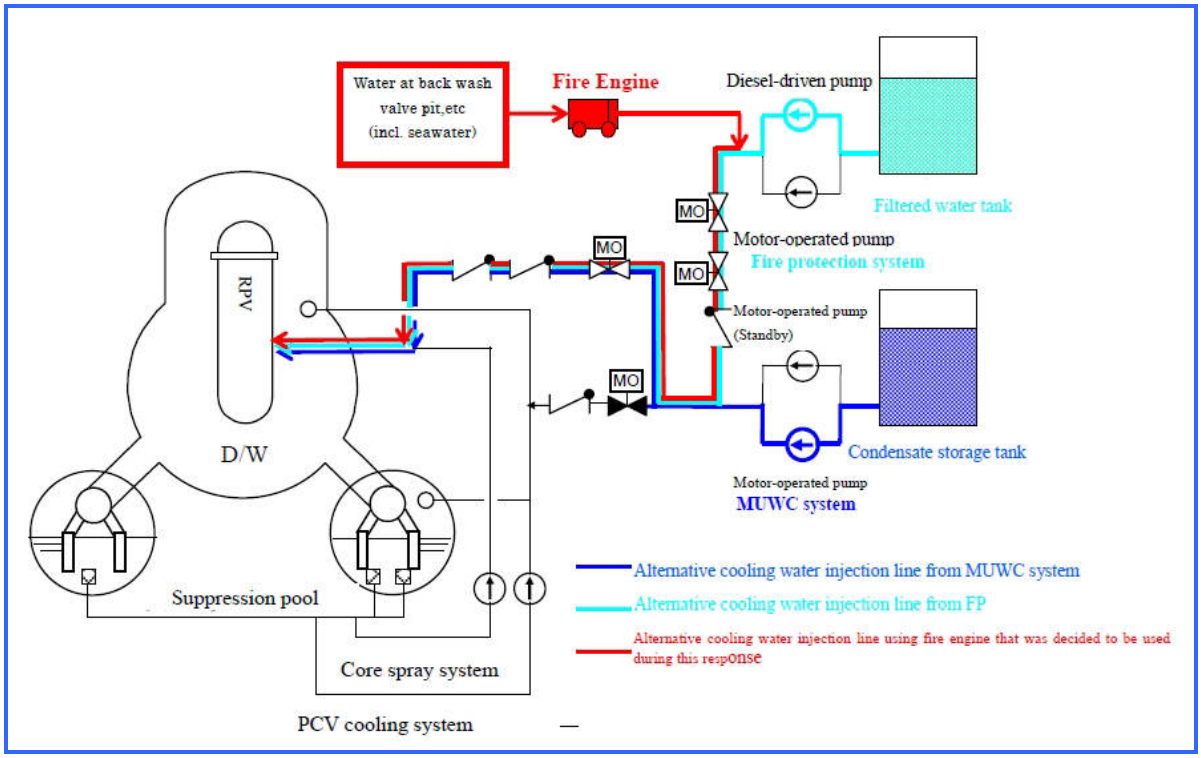
Stand es aber nicht.

In den 90er Jahren hat die US NRC eine Weisung herausgegeben, die Reaktoren vom Typ General Electric Mark I mit Notstromdieseln nachzurüsten und als finale Sicherheitsmaßnahme die Stromversorgung mit mobilen Generatoren und die Kühlmittelversorgung mit mobilen Pumpen vorzubereiten mit entsprechenden Anschlüssen, Hand-

lungsanweisungen für die Mannschaft zu erstellen und die Mannschaft entsprechend zu trainieren.

Erst nach Ablauf der 72 Stunden und dem Eintreten der Kernschmelze wurden alle drei Reaktoren nach den ersten Anlaufschwierigkeiten über die "fire protection line" mit Kühlwasser versorgt. Bei dieser Leitung handelt es sich um die für die mobile Kühlwassereinspeisung vorgesehene Leitung, die in den 90er Jahren für die mobile Einspeisung für schwere Störfälle nachgerüstet worden ist.

In den Berichten findet man die Information, dass der Block 1 mit einer Feuerwehrpumpe nach 9 Stunden über diese Leitung aus einem Löschwassertank versorgt wurde. Dort findet sich auch der Hinweis, dass dies die einzige verfügbare Feuerwehrpumpe war und dass der Löschtank nach ca. 14 Stunden leer war.



Da drängt sich der Verdacht auf, dass nicht genügend Löschwasser bevorratet war, dass es nicht pro Block zwei mobile Generatoren und Pumpen gab und dass diese Notversorgung nicht geübt wurde. Mit einem Wort: Der Betreiber hat die Nachrüstmaßnahmen für den totalen Stromausfall allenfalls unvollständig umgesetzt. Erst nach über einem Jahr ist TEPCO mit diesen Fakten herausgerückt und das auch nur in einem Bericht, der nicht ins Englische übersetzt wurde.

Es ist ein schwerwiegender Fehler des Betreibers, dass er die Empfehlungen für Notfall-Maßnahmen für den Störfall "station black-out" nicht adäquat umgesetzt hat. (Betreiber-Fehler Nr.1)

6 Die ersten Stunden

6.1 Vorbemerkung

Was in den ersten Stunden wirklich geschah, liegt trotz der vielen Veröffentlichungen im Dunkel und wird wohl nicht geklärt werden können, da die offiziellen Stellen und TEPCO kein Interesse haben, dies aufzuklären und klare Schuldzuweisungen zu ermöglichen. Nach jedem Störfall haben alle vier Beteiligten und das sind der Hersteller, der Betreiber, die Genehmigungsbehörde und die Betriebsmannschaft ein Problem. Sie müssen im nach hinein den Unfallablauf so darstellen, dass sie keine Schuld trifft, weil es eine unabwendbare schicksalhafte Fügung war, und einem der anderen Parteien den schwarzen Peter zuzuschieben. In der Regel zieht die Betriebsmannschaft den Kürzeren, das sie nicht in den offiziellen Kommissionen, die den Unfall auswerten, vertreten ist, und den schlechtesten Zugang zur veröffentlichten Meinung hat.

Alle offiziellen Berichte zum Störfallablauf sind dementsprechend kritisch zu betrachten. Selbst im TEPCO Final Report finden sich unendliche viele zum größten Teil belanglose Details, Fakten und Hypothesen bunt gemischt, so dass es dem Leser schwer fällt, die Information richtig einzuordnen. Immerhin gibt es von den wichtigsten Anlagenparametern wie Reaktorfüllstand oder RDB-Druck Messdaten. Zu anderen für die Unfallanalyse genauso wichtigen Parameter, welche Schaltvorgänge die Operateure mit oder ohne Erfolg durchgeführt haben, gibt es nur sporadische Informationen.

Der abschließende TEPCO Final Report präsentiert auf vielen Seiten endlose Details und mehr oder weniger genaue Fakten und suggerieren so, dass dem Leser alles ganz genau und haarklein präsentiert wird, aber die einfachsten Fragen werden nicht beantwortet:

- Was war der Plan des Betreibers im Fall eines Verlustes der Stromversorgung?
- Welche Vorbereitungen hatte er für diesen Fall getroffen?
- Wie lauteten die Handlungsanweisungen für die Betriebsmannschaft?
- Welche Sicherheitssysteme wurden aktiviert und deaktiviert und von wem?

Wie in Kapitel 2 dargelegt, verfügte jeder Block über Kühlsysteme, die nur mit Batteriestrom arbeiten können und deshalb auch bei einem totalen Stromausfall (station blackout) noch zur Verfügung stehen. Wenn diese passiven Sicherheitssysteme bestimmungsgemäß funktioniert hätten, dann hätten die Anlagen die ersten 72 Stunden ohne Probleme überstanden und erst danach hätte es zu einer Kernschmelze kommen dürfen. Haben sie aber nicht und das ist die wirkliche spannende Frage, die erhebliche Auswirkungen auf die Einschätzung der Sicherheit aller existierenden Atomreaktoren hat. Jeder Reaktorsicherheitsexperte muss sich doch die Frage stellen, ob die Methoden und Bewertungen der Reaktorsicherheit nicht fehlerhaft sind und falsche zu optimistische Zahlen liefern.

Der übliche Plan bei einem Ausfall der Not- und Nachkühlung ist es, mit den genanten Systemen die drohende Kernschmelze mindestens 24 Stunden lang oder sogar 72 Stunden herauszuzögern. In dieser Zeit sollte die Betriebsfeuerwehr mit mobilen Pumpen in einer dazu vorbereitete Leitung Kühlmittel in den RDB einspeisen. Der Plan in Fukushima war es, mit den passiven Systemem IC und RCIC die den Kern die ersten 72 Stunden zu kühlen und in dieser Zeit, eine externe Kühlung mit mobilen Feuerwehrautos herzustellen. Dazu waren in allen vier Blöcken die entsprechenden Leitungen ("fire protection line") nachgerüstet worden und einsatzbereit.

Man darf sich die externe Einspeisung mit mobilem Gerät nicht zu kompliziert vorstellen. Sie ist ganz einfach: Irgendwo an einer geschützten Stelle am Reaktorgebäude außen befindet sich ein Anschlussstutzen für Feuerwehrschläuche. Dort lässt sich eine gewöhnliche Feuerwehrpumpe, wie sie zur Standardausstattung jedes Feuerwehrautos gehört, anschließen. Diese Pumpe muss mit einem Wasservorrat (Tankwagen, Wassertank oder Meer) verbunden werden; der Diesel, der die Pumpe mit Strom versorgt wird gestartet und schon wird genug Wasser in das Reaktordruckgefäß gepumpt, um den Kern ausreichend zu kühlen.

Hinterher ist man immer schlauer und bei einer Notfallübung nach dem Unglück benötigte die Betriebsfeuerwehr in Fukushima weniger als eine Stunde, um die mobile Einspeisung zu installieren und die externe Kühlung zu starten.

6.2 Block 1

Der Block 1 verfügte über das „Containment Isolation Condensor“ System (IC), das aus zwei unabhängigen Teilsystemen A und B besteht. Außerdem gibt es noch ein zweites passives Sicherheitssystem, das „High Pressure Coolant Injection“ System (HPCI). Schon vor dem Tsunami wurde das IC System per Hand zur Nachkühlung gestartet, dann aber wieder per Hand abgeschaltet, weil die Abkühlung zu schnell erfolgte. Dieser Vorgang wird im TEPCO Final Report nicht weiter kommentiert, obwohl es im Widerspruch zu anderen Aussagen von TEPCO steht. Nach dem Erdbeben standen im Block die üblichen Nachkühlsysteme, also das HPCI und das LPCI zur Verfügung. Der normale Prozedur wäre also gewesen, zunächst mit dem HPCI den Druck soweit abzusenken bis das LPCI die langfristige Kühlung übernehmen kann.

Nach Aussagen von TEPCO ist der IC nur ein zusätzliches Sicherheitssystem, das nur in Notfällen zum Einsatz kommt und dies ist der Grund, warum die Operateure nicht ausreichend im Einsatz von diesem System geschult waren. Damit stellt sich die Frage, warum unter normalen Abfahrbedingungen das IC zugeschaltet wurde.

Das IC ist einfaches und zuverlässiges passives Sicherheitssystem, das in block 1 zweimal vorhanden war (System A und System B). Um es in Betreib zu nehmen, muss nur ein mit einem Elektromotor gesteuertes Ventil geöffnet werden, danach arbeitet es ohne jede Stromzufuhr solange, bis alles Wasser in den Tanks verdampft ist. Da würde für 72 Stunden die ausreichende Kühlung des Reaktorkerns sicherstellen.

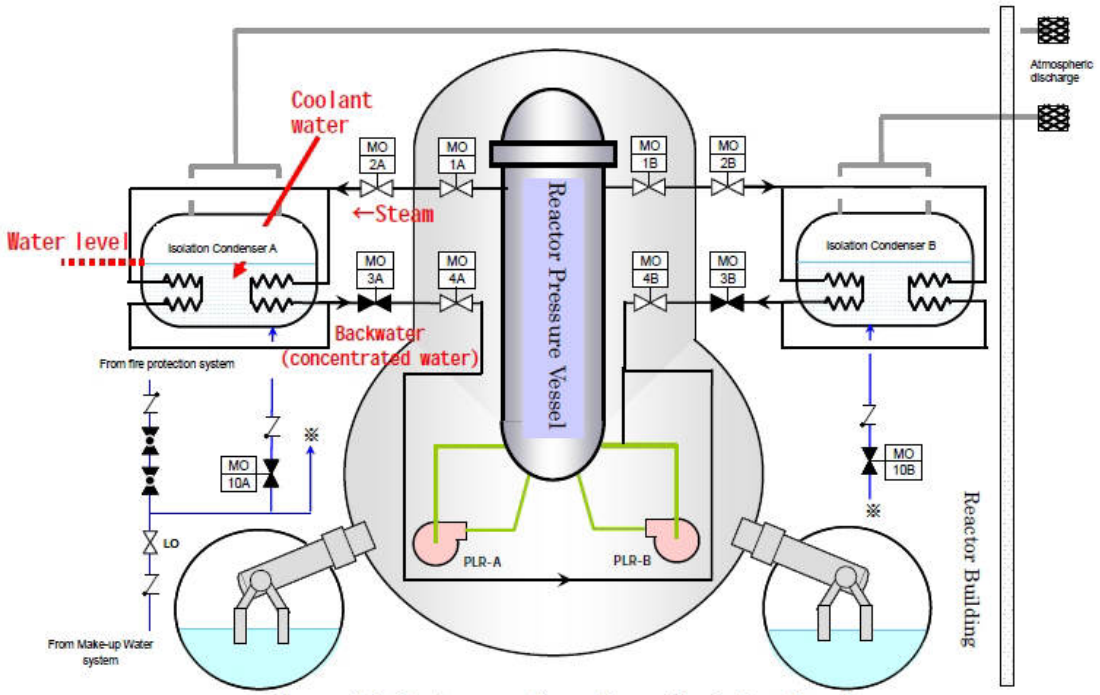


Figure 1 : System configuration of Isolation Condenser

Wie das Bild zeigt, muss lediglich das Motorventil MO-3A bzw. MO-3B geöffnet werden. Die vier Ventile pro Strang dienen dazu, dass bei Bedarf, z.B. bei einem Leck im IC System außerhalb des Containments, das IC System sicher vom Rest des Reaktors isoliert werden kann und ein Versagen des Systems sich nicht zu einem großen Problem für den Reaktor führt.

Die Leittechnik und den Strom für den Motor liefert ein eigenes Batteriesystem im Keller, das unabhängig ist von den allgemeinen Notstrom-Batterien - schreibt TEPCO im Final Report. Mit dem Tsunami fiel dieses Batteriesystem teilweise aus. Wenn man der Schilderung von TEPCO glauben darf, wurde das Ventil nach den Tsunami noch einmal vom Operateur aufgefahren und dann – weil das Kontroll-Licht nicht aufleuchtete – wieder zugefahren.

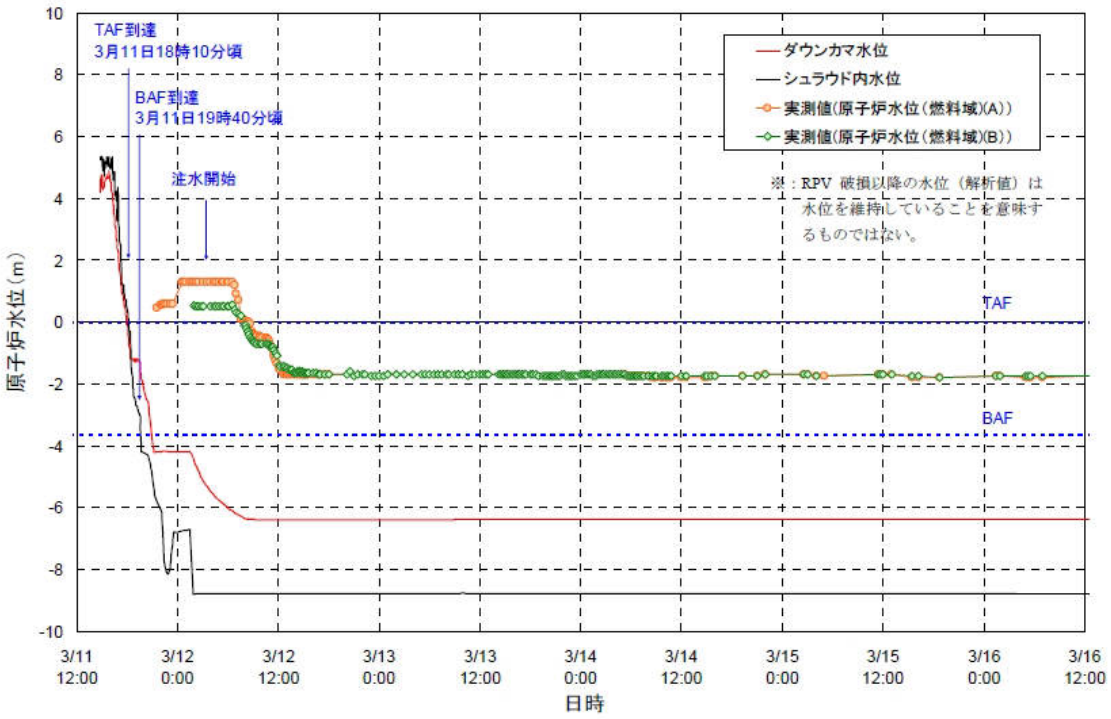
Wie auch immer, nach dem Tsunami war das IC abgeschaltet und es kam wie es ohne Kühlung kommen musste, nach 8 Stunden begann die Kernschmelze. Bei den späteren Inspektionen von Block 1 galt dem IC das besondere Interesse und es wurde festgestellt: Das IC ist weitgehend unbeschädigt und voll einsatzfähig. Das Ventil vom IC System A ist geschlossen, das System vom IC System B ist zu 80% geschlossen, die Tanks sind noch über die Hälfte gefüllt. Mit einem Wort: Dumm gelaufen.

Die Information in den Berichten ist nebulös und dient eher zur Verschleierung dessen, was wirklich passiert ist. Was auch immer passiert ist - Bedienungsfehler, hängen gebliebenes Ventil oder schlichtes Versagen des Systems – man wird es wohl nie erfahren. Das Ganze ist schon bemerkenswert, denn das System war zweimal vorhanden. Beide Systeme haben keine Wirkung gezeigt.

Das HPCI System ist in Block 1 einmal vorhanden und ist nicht zu Einsatz gekommen. In den ersten Berichten wird verschwiegen, warum es nicht in Betrieb genommen wurde. Es ist schwer vorstellbar, dass die Betriebsmannschaft nicht zumindest versucht haben soll, das HPCI System zu starten. Der vertrauliche Abschlußbericht von TEPCO sagt, dass gleich nach dem Tsunami der nötige Batteriestrom nicht mehr zur Verfügung stand.

Obwohl es so aussieht, als würden die Operateure mit ihrem Verhalten maßgeblich zur Kernschmelze in Block1 beigetragen haben, muss man ihnen zugute halten, dass in Block 1 durch den Tsunami die meisten Ausfälle von Systemen erfolgt sind. Am schwerwiegendsten war der nahezu komplette Stromausfall, der dazu führte, dass die Operateure auf der Warte nur noch ganz wenige Anzeigen hatten. In dieser Situation taten die Operateure das einzig Richtige und zeigten dabei große Initiative.

Sie beschafften neue volle Batterien, um sie auf der Warte an die Leittechnik anzuschließen und so wieder einen Überblick über den Zustand des Reaktors zu bekommen. Dazu bauten sie kurz entschlossen, die Autobatterien aus den geparkten Autos aus und schickten Leute los, um Batterien vom nächsten Baumarkt zu holen. Die Batterien in den Atomkraftwerken sind nämlich nichts anderes als die üblichen Autobatterien und man erzählt sich die Geschichte, dass die Verkäufer in den Baumärkten nur gegen Bezahlung mit Kreditkarte der Operateure die Batterien herausgerückt haben.



1 号機　原子炉水位変化

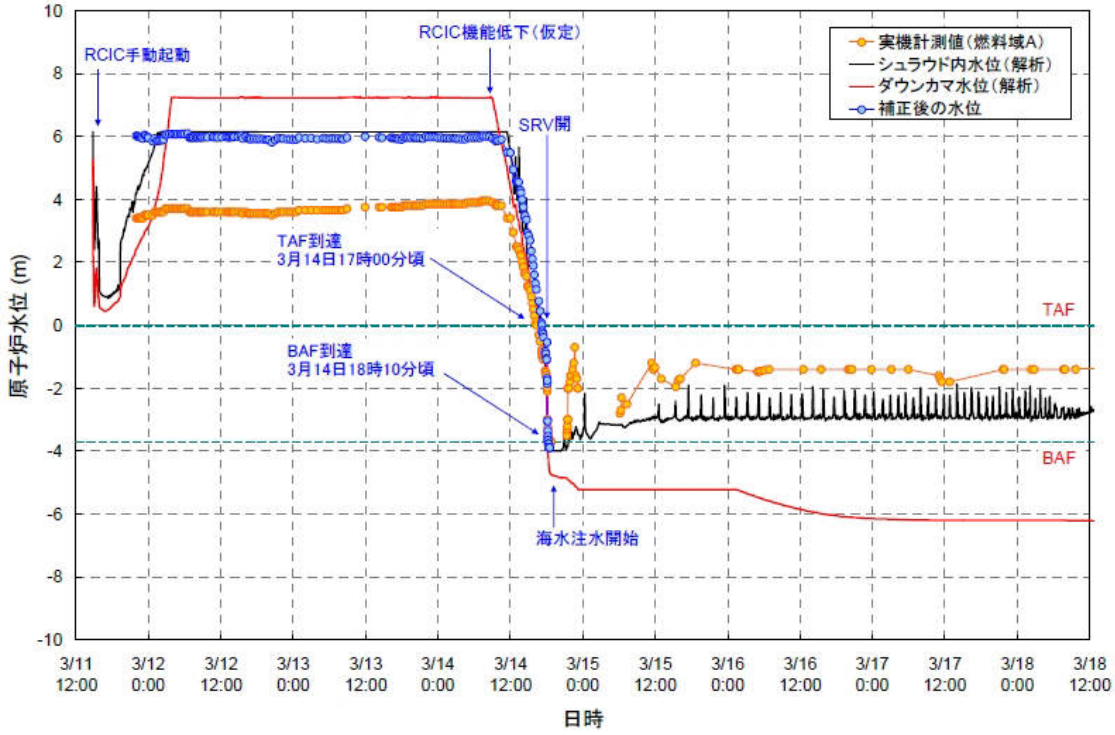
Das Bild zeigt den gemessenen zeitlichen Verlauf des Füllstands im Reaktordruckbehälter. Die rote und schwarze Linie sind gerechnete Werte, die gelben und grünen Punkte sind die gemessenen Werte. Man sieht, dass erst gegen 22:00 die Bedienungsmannschaft dank der Autobatterien wieder die Stromversorgung der Füllstandmessung wieder hergestellt hatte und erst zu diesem Zeitpunkt genauere Informationen über den Zustand des Kerns hatte. Es standen dann zwei unabhängige Messwerte zur Verfügung (System A und System B) und beide zeigten zu diesem Zeitpunkt an, dass der Kern noch ausreichend gekühlt ist: Füllstand über Oberkante der aktiven Zone der Brennelemente (TAF = Top of Active zone of Fuel elements). Natürlich ist es bei einem Schweren Störfall immer eine gute Frage, wie weit man den angezeigten Werten glauben darf.

Erst gegen Mittag des 12. März fiel die Anzeige unter die Unterkante der aktiven Zone der Brennelemente (BAT = Bottom of Active zone of Fuel elements). Vier Stunden später erfolgte die Explosion.

Für die an Einzelheiten interessierten Leser wird im Anhang 3 der Schadensbericht von Block 1 gezeigt.

6.3 Block 2

Der Block 2 verfügte über ein HPCI System und über ein "Reactor Core Isolation Cooling" System (RCIC). In Block 2 hat die Bedienungsmannschaft alles richtig gemacht, wie die Messwerte des Füllstands im Reaktordruckgefäß zeigen.



２号機　原子炉水位変化

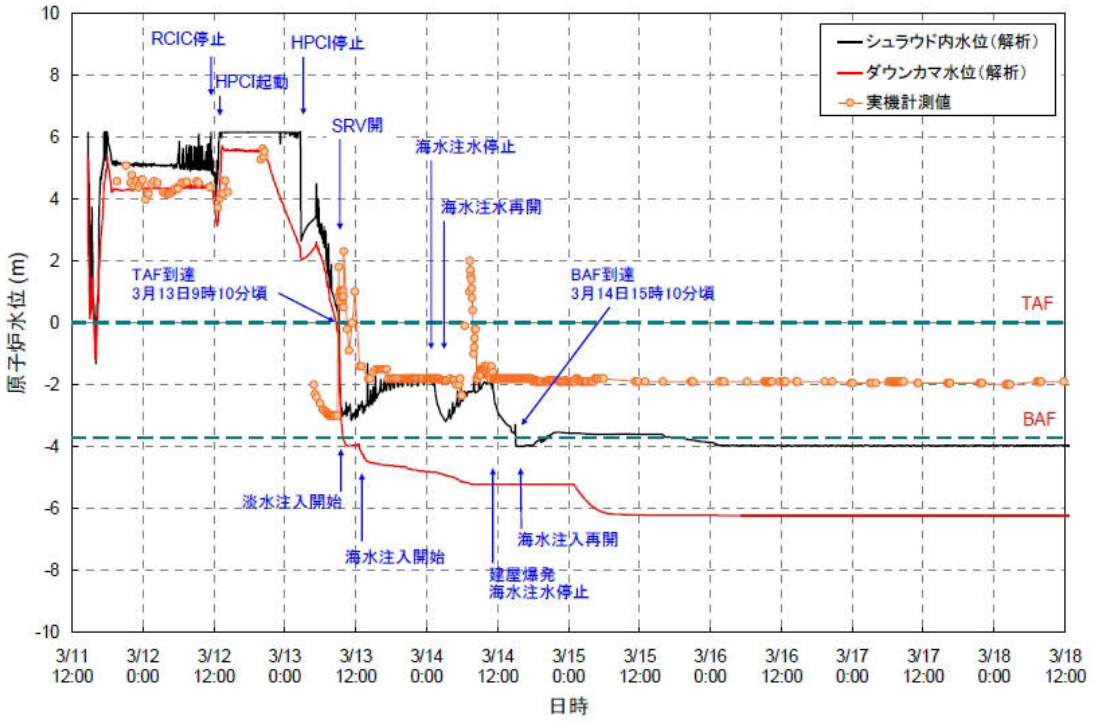
Als kurz nach dem Tsunami das RCIC startet – per Hand oder per Steuerungsautomatik ist unklar -, ließen sie es einfach laufen. Wie man an den gemessenen Füllständen sieht (blaue und gelbe Kreise), sorgte das System die nächsten 72 Stunden dafür, dass der Kern ausreichend gekühlt wurde. Gegen Ende dieser Frist bereitete die Bedienungsmannschaft die externe Einspeisung vor und hatte schon die mobile Wasserversorgung mittels Feuerwehrautos und Schläuchen vorbereitet und war bereit zum Start, als der Block 3 explodiert und alles zunichte machte: Die Feuerwehrleute brachten sich erst einmal in Sicherheit und die Schläuche und Feuerwehrautos waren zerstört.

Die Bedienungsmannschaft in Block 2 hat alles richtig gemacht und fast wie im Lehrbuch die Situation gemeistert. Das war eine Spitzenleistung. Dass die Explosion im Nachbarblock trotzdem auch zur Kernschmelze in Block 2 führte, zeigt, dass

man bei der Sicherheitsanalyse auch die unwahrscheinlichsten und aberwitzigsten Szenarien nicht von Anfang an ausschließen sollte.

6.4 Block 3

Der Block 3 verfügte über ein HPCI System und über ein "Reactor Core Isolation Cooling" System (RCIC). Beide kamen zum Einsatz, wie das Bild mit den Messwerten des Füllstands des Reaktordruckgefäßes zeigt.



3号機　原子炉水位変化

Das Bild zeigt dass in Block 3 genauso wie in Block 2 das RCIC startet und zunächst den Füllstand hoch hielt. Dann aber, nach ca. 24 Stunden, wurde das RCIC abgeschaltet und die Steuerungsautomatik startet das HPCI. Warum das RCIC abgeschaltet wurde, bleibt unklar und TEPCO vermeidet jede klare Aussage dazu. Allerdings steht im Geheimbericht von TEPCO, dass das RCIC abgeschaltet wurde, um Batteriestrom für den Betrieb der Messtechnik zu sparen. Das passive RCIC benötigt keine großen Strommenge zum Antrieb der Pumpe, dies erfolgt ja über die Dampfturbine, aber es werden kleine Menge Batteriestrom für die Regelung benötigt. Dieses System ist nicht selbst regelnd. Ohne Batteriestrom schaltet es von selber ab.

Als das RCIC abgeschaltet wurde, sank der Füllstand im RDB und die Füllstandregelung startete das HPCI. Das HPCI benötigt ebenfalls keinen Strom für den Pumpenantrieb aber Batteriestrom für die Regelung. Nach ca. 12 Stunden war das HPCI in Betrieb. Dann stellte es den Betrieb ein. TEPCO verbreitetet dazu zwei unterschiedliche Informationen. Die erste besagt, dass die Batterien leer waren und das HPCI daraufhin nicht mehr arbeitete. Die zweite besagt, das es abgeschaltet wurde, um mit der externen Einspeisung über die Feuerwehrautos beginnen zu können. Dazu musste der Druck im RDB mit Hilfe der Abblaseventile abgesenkt und das geht nur, wenn nicht gleichzeitig mit hohem Druck eingespeist wird.

6.5 Konsequenzen aus dem Versagen der passiven Systeme

Alle drei Blöcke waren mit passiven Sicherheitssystemen, die in der Lage gewesen wären, die Reaktorkerne für 72 Stunden zu kühlen. Aber Eingriffe der Operateure, Eingriffe der automatischen Steuerung und Mangel an Batteriestrom für die Regelung haben in Block 1 und Block 3 dazu geführt, dass diese Systeme ihre Aufgabe nicht für 72 Stunden erfüllten.

Daraus ergibt sich, dass vom Design her nicht sichergestellt war, dass diese passiven Notfallsysteme bei einem totalen Stromausfall eingeschaltet sind und sich auch nicht mehr abschalten lassen, weder vom Operateur noch von der Steuerungsautomatik noch durch Ausfall des Notstroms aus Batterien.

Dies lässt sich technisch sicherstellen entweder automatisch durch Öffnen magnetisch geschlossen gehaltener Ventile oder über eine eigene Stromversorgung direkt an den Ventilen, die nur bei totalem Stromausfall in Betrieb genommen werden und erst bei Wiederverfügbarkeit des Notstroms ausgeschaltet werden kann.

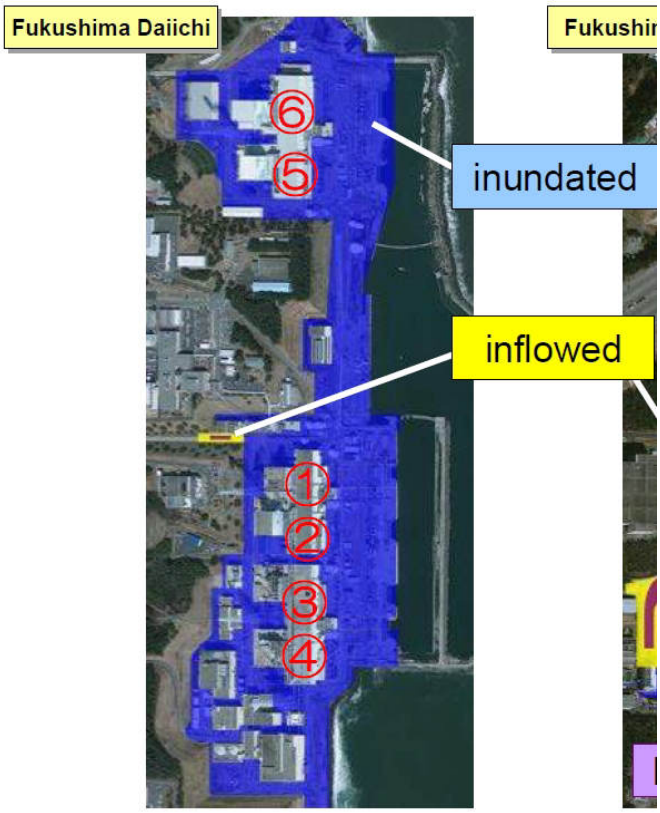
Es ist ein schwerwiegender Design-Fehler, dass die passiven Sicherheitssysteme, die ohne ständige Stromversorgung auskommen, nicht so geschaltet waren, dass sie bei einem totalen Stromausfall zuverlässig starten und solange in Betrieb bleiben, bis die Stromversorgung der Anlage wieder hergestellt ist. (Design-Fehler Nr. 3)

6.6 Mobile externe Einspeisung

Wie bereits geschildert, war der Plan, bei drohendem Verlust der Kühlung innerhalb von Stunden eine externe Kühlung mittels mobiler Geräte an die vorhanden fire injection lines anzuschließen. In ersten 24 Stunden wurde nur in Block 1 die mobile Versorgung durch die Feuerwehr installiert und zwar nach erst nach 14 Stunden. Die anderen Blöcke wurden erst viel später an die mobilen Feuerwehrsysteme angeschlossen.

Die Begründung dafür ist nebulös. Es werden die Erschwernisse beim Zugang zu den Blöcken infolge des Tsunamis und des Erdbebens angeführt. Fakt ist, durch den Tsunami wurden nur ca. 30 Meter um die vier Blöcke betroffen, alle anderen Gebäude und Einrichtung der Anlage wurden vom Tsunami nicht erreicht. Größere Erdbebenschäden gab es weder auf dem Anlagengelände noch in der weiteren Umgebung.

Das Bild zeigt die Angaben von TEPCO zum Ausmaß der Überflutung.

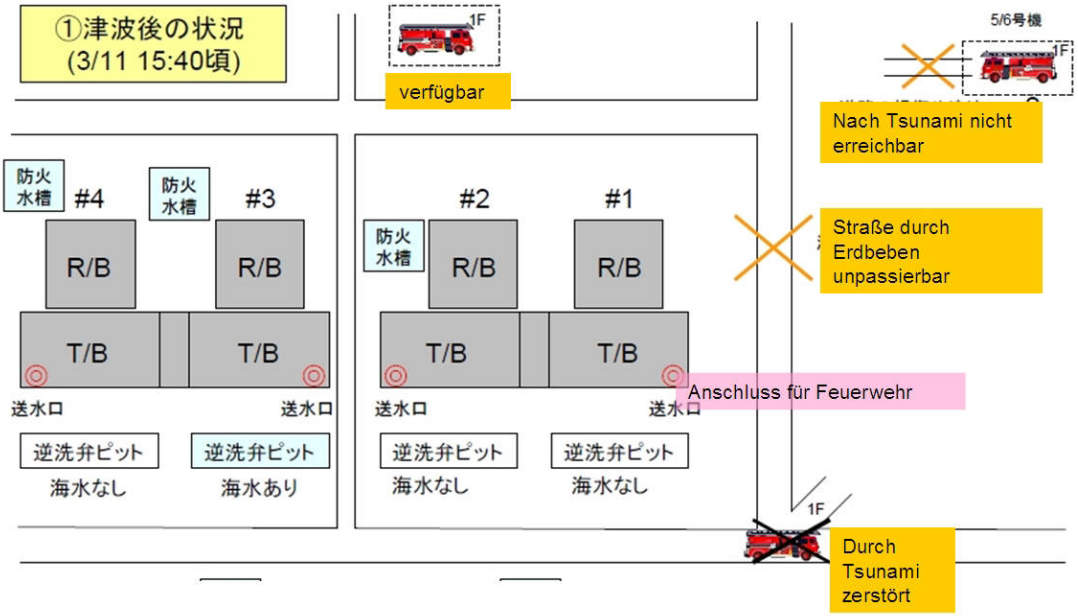


Im Internet ist dass Google Earth Bild vom 12.3.2011, also nach dem Tsunami und vor den Explosionen zu finden.

Datei Bearbeiten Ansicht Tools Hinzufügen Hilfe
3/12/2011
2003
2011
© 2012 Europa Technologies
Image © 2012 DigitalGlobe
© 2012 ZENRIN
Google earth
Bildaufnahmedatum: 3/12/2011
2003
37°25'01.24" N 141°01'44.10" O Höhe 34 m
Sichthöhe 1.17 km

Nur die dunkle Zone wurde also überflutet. Die Zugänglichkeit der Anlage war also höchstens direkt an den Gebäuden erschwert. Damit lässt sich nicht erklären, warum es dem Betreiber nicht gelungen ist, wie geplant innerhalb von 8 Stunden die mobile Kühlmitteleinspeisung in Gang zu bringen.

Nach Angaben von TEPCO waren zum Zeitpunkt des Tsunamis drei Feuerwehrautos auf dem Gelände: eins ging durch den Tsunami verloren, eins war nach dem Tsunami nicht mehr zu erreichen und nur eins war noch einsatzbereit.



Mit einem Wort, es fehlte an ausreichendem Gerät und das wenige vorhandene Gerät war nicht in einem gegen Einwirkungen von außen geschützten Gebäude.

Es ist ein schwer wiegender Fehler des Betreibers, dass er nicht ausreichend dafür gesorgt hat, dass die benötigte mobilen Geräte und die erforderliche Bedienungsmannschaft zur Verfügung standen und die Bedienungsmannschaft ausreichend geschult war. (Betreiber-Fehler Nr.2)

Ein Punkt, der in den Berichten nicht behandelt wird, ist die Frage nach der Betriebsfeuerwehr. Ganz klar, die Anlage muss über eine eigene Betriebsfeuerwehr verfügen, die entweder auf dem Anlagengelände oder in dem 2 km entfernten Notfallzentrum stationiert ist. Bei 6 Blöcken sind 6 Feuerwehrzüge und - bei der in der Kerntechnik übli-

chen Redundanz 12 Feuerwehrzüge erforderlich, denn man kann nicht ausschließen, das bei einem Brand aufgrund gemeinsamer Ursache ("common mode") es in mehreren Blöcken gleichzeitig brennt. Nur drei Feuerwehrautos sind sicher viel zu wenig.

Diese Feuerwehr muss auch über ein ganzes Sortiment an mobilen Pumpen und mobilen Generatoren verfügen und in der Lage sein, bei einem Leitungsbruch einen voll gelaufenen Keller umgehend leer zu pumpen. Es ist nahe liegend, nach dem Tsunami die Feuerwehr loszuschicken, um die Kellerräume mit den Notstromdieseln und den Stromverteilern wieder leer zu pumpen. Irgendwie erwartet man, dass in den Berichten davon etwa zu lesen ist, dass (vergebliche) Versuche zum erneuten Start der Notstromdiesel gemacht wurden. Offensichtlich war die Betriebsfeuerwehr nicht ausreichend ausgerüstet und ausgebildet.

Es ist ein schwerwiegender Fehler des Betreibers, dass er die Betriebsfeuerwehr nicht adäquat ausgerüstet und ausgebildet hat, dass sie zu einer Schadensbegrenzung nach dem Tsunami wesentlich beigetragen hat. (Betreiber-Fehler Nr. 3)

7 Die Explosionen

Nur wenn es gelingt, nach Ausfall der Kühlung innerhalb von 8 Stunden die Kühlung der Reaktoren wieder herzustellen, lässt sich eine Kernschmelze vermeiden, sonst ist sie unvermeidlich. Dies kann entweder dadurch erfolgen, dass wieder Strom zur Verfügung stehen und die Kühlsysteme wieder arbeiten oder durch eine externe Einspeisung von Kühlwasser mit Hilfe von mobilen Geräten (Feuerwehrautos). Wenn man die Kühlung nicht innnerhalb dieses Zeitraums wieder herstellt, lässt sich die radioaktive Freisetzung nicht mehr verhindern sondern man verhindert nur noch die weitere Verlagerung der Kernschmelze innerhalb des RDBs.

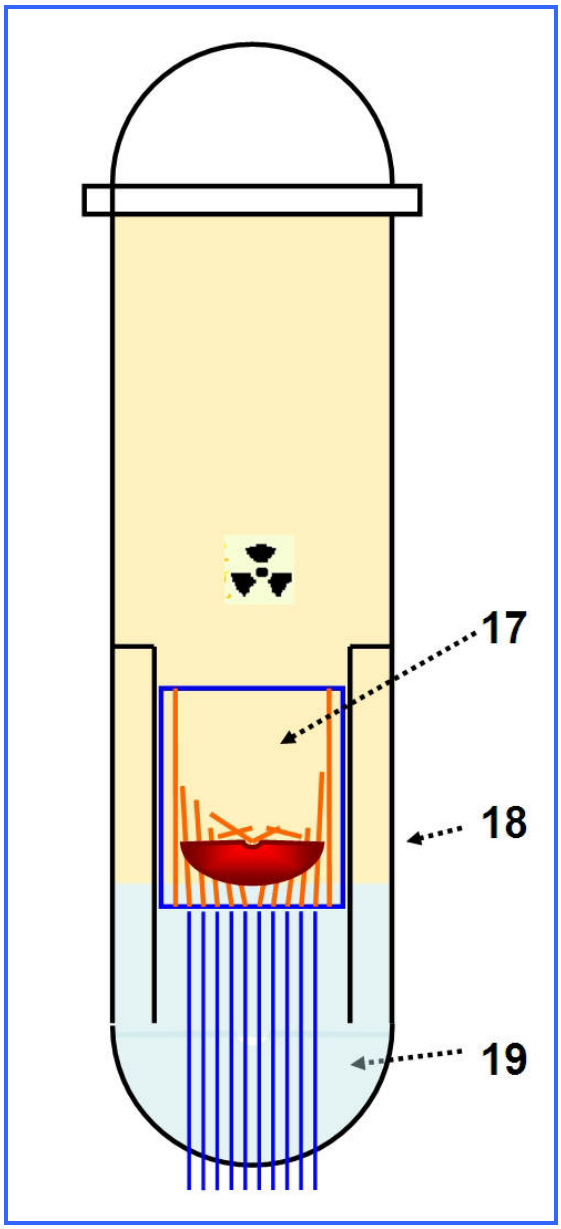
Die Kernschmelze besteht aus zwei Phasen: In der ersten Phase bildet sich ein Schmelzesee im Bereich des Reaktorkerns. Bei unzureichender Kernkühlung fällt der obere Teil des Reaktorkerns trocken und die Hüllrohre der inneren Brennelemente werden undicht und fangen an zu schmelzen. Bereits dadurch kommt es zu einer massiven Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten in den Kühlkreislauf, zunächst in den RDB und über die Abblaseleitung auch in das Containment. Dann hängt alles davon ab, dass das Containment dicht bleibt.

Ab 1500°C setzt die Zirkon-Wasserdampf-Reaktion ein, bei der das Zirkon der Hüllrohre mit den Wassermolekülen reagiert, in dem das Zirkon das Sauerstoffatom unter Wärmefreisetzung wegnimmt. Es entsteht Zirkonoxyd und Wasserstoff (auch Knallgas genannt). Der Zirkonbrand bewirkt eine rasche Kernaufheizung und Kernzerstörung. Die Brennelemente verlieren ihre Form und schmelzen zusammen. (17)

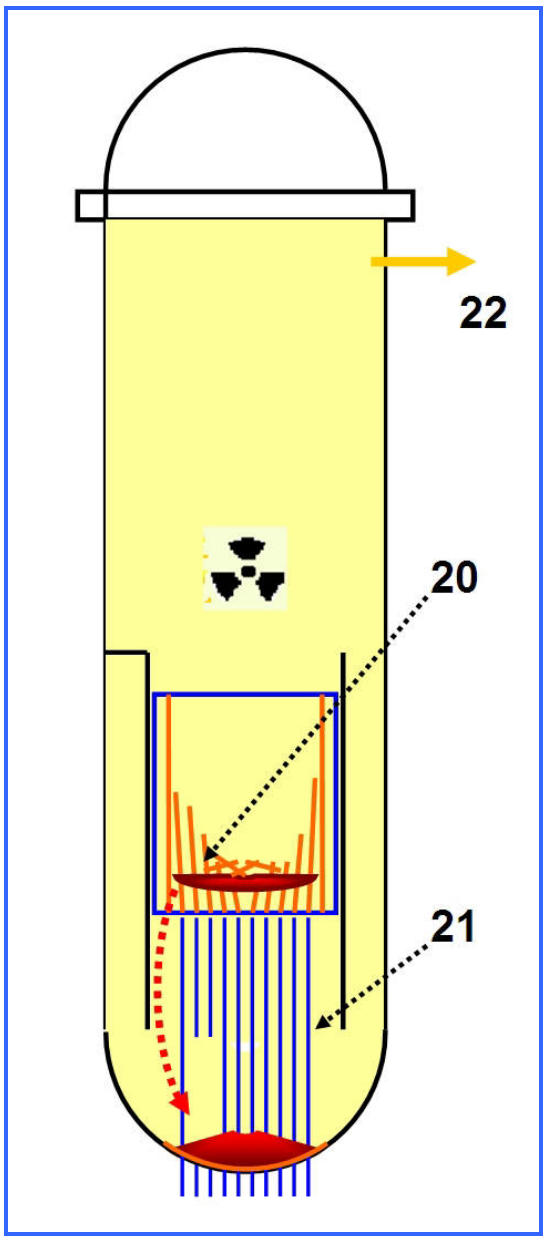
Ab 2500°C bildet Zirkon und das Uranoxyd des Uranbrennstoffes eine flüssige Phase, das sog. Corium. Dabei werden alle leicht- und mittelflüchtigen radioaktiven Spaltprodukte freigesetzt. Die schwerflüchtigen verbleiben in der Schmelze.

Das flüssige Corium bildet im unteren Teil des Kerns einen Schmelzepool, der von einer festen Kruste aus Corium umgeben ist (18). Aufgrund der Konvektion im Schmelzepool liegen die höchsten Temperaturen und die dünnste Kruste am oberen Rand des Schmelzepools.

Unterhalb vom Kern steht Wasser im unteren Plenum des Reaktordruckgefäßes (19).



Die zweite Phase der Kernschmelze besteht in der Verlagerung der Schmelze in den unteren kugelförmigen Boden des RDB und der Bildung eines zweiten Schmelzepools im Bereich des unteren Plenums. Sobald der Schmelzepool in Kernbereich zu groß und zu heiß wird, dann kommt es zum Krustenversagen, seitlich am Schmelzepool und ein Teil des Coriums verlagert sich ins untere Plenum (20). Die heiße Schmelze verdampft zunächst das Wasser im unteren Plenum und heizt sich weiter auf.



Der weitere Ablauf ist sehr ungewiss und hängt stark von der Wärmeproduktion in der Schmelze ab. In Anbetracht der Tatsache, dass im unteren Plenum ein Wald von Rohrdurchführungen ist (21), gibt es Grund zur Annahme, dass es nicht zu einem Durchschmelzen des Reaktordruckgefäßes kommt:

1) Entweder ist die Wärmeleitung durch die Rohrleitungen nach außen so gut, dass die Wärme über die Rohre ausreichend nach außen abführt.

2) Oder die Schmelze bringt auch die Rohrleitungen zum Schmelzen. Dadurch vergrößern sich das Volumen und die Oberfläche des Schmelzepools und damit die Höhe des Wärmeflusses pro Fläche. Dies bewirkt, dass der maximale Wärmefluss nicht mehr zum Durchschmelzen der dicken RDB-Wand ausreicht.

Es kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass geringe Menge der Schmelze auch durch die Durchführungen ins Containment gelangt und dort auf die Betonplatte unterhalb des RDB fallen, aber dort ist dann Endstation. Für die Freisetzung von Radioaktivität spielt das aber keine Rolle, da die leicht-flüchtigen radioaktiven Spaltprodukte bereits über die offene Abblaseleitung ins Containment gelangt sind (22). Wäre die Abblaseleitung geschlossen, dann würde der RDB versagen, vermutlich im unteren Plenum und dort das Gas heraus geblasen.

Da das Containment nie perfekt dicht ist, steigt bereits zu diesem Zeitpunkt die Radioaktivität.

Durch die Zirkon-Wasserdampf-Reaktion werden große Mengen von Wasserstoffgas gebildet und die Containment-Atmosphäre besteht im Wesentlichen aus Stickstoff und Wasserstoffgas, also zwei nicht kondensierbaren Gas. Aufgrund der Wasserstoffgasbildung steigt der Containmentdruck an und kann über den Auslegungsdruck des Containments steigen. Spätestens jetzt ist als finale Notmaßnahme die kontrollierte Druckentlastung des Containments durchzuführen.

In allen drei Blöcken hat das Versagen der Kühlung zur Katastrophe geführt. Der Weg in allen drei Blöcken war ähnlich, aber der Zeitablauf und das Ausmaß der Freisetzung hängen von so vielen Details ab, dass es aufgrund der Unterschiede in den einzelnen Parametern niemals gleich ablaufen kann.

Die wesentlichen Ereignisse im Block1 zeigt die Tabelle.

	Block 1
11.3. - 15:37	Ausfall der Notstromdiesel und der Kühlwasserversorgung
12.3. – 5:46	Kühlmitteleinspeisung aus dem Löschtank mit mobiler Pumpe in die „fire protection line“
12.3. – 9:00	Erster Versuch zur kontrollierten Druckentlastung des Containments – wird wegen hoher Strahlung abgebrochen
12.3. – 14:30	kontrollierten Druckentlastung des Containments

12.3. – 15:36	Explosion zerstört das Reaktorgebäude
12.3. – 19:04	Meerwasser-Einspeisung in die „fire protection line“ mit mobiler Pumpe
22.3.	Stromversorgung des Kontrollraums wiederhergestellt

In Block 1 wurde das IC System, das die Kernschmelze verzögert hätte, vom Operator abgeschaltet und nach dem Tsunami nicht wieder richtig in Betrieb genommen. Das Ergebnis war eine Kernschmelz nach 8 Stunden und eine Wasserstoffexplosion am nächsten Tag. Das Bild zeigt die Explosion in Block 1.

In Block 2 sah es zunächst besser aus, das es gelungen war, sofort nach dem Tsunami das RCIC zu starten und die Kernschmelze um 72 Stunden zu verzögern. Mit mehr Glück hätte die Mannschaft sogar die externe Einspeisung rechtzeitig begonnen, aber die Explosion von Block 3 machte alle Anstrengungen zunichte. Die wesentlichen Ereignisse zeigt die Tabelle.

	Block 2
11.3. – 15:37	Ausfall der Notstromdiesel und der Kühlwasserversorgung
11.3. – 15:39	Start des passiven Kühlsystems RCIC
12.3.	Keine signifikanten Ereignisse
13.3. – 11:00	Beginn der kontrollierten Druckentlastung des Containments
14.3. – 14:00	Vorübergehende Unterbrechung der kontrollierten Druckentlastung des Containments als Folge der Explosion in Block 3
14.3. – 18:00	Druckentlastung des RDB über die Abblaseleitung
14.3. – 19:54	Meerwasser-Einspeisung in die „fire protection line“ mit mobiler Pumpe
15.3. – 6:10	Explosion und vollständiger Druckabfall im Containment
26.3.	Stromversorgung des Kontrollraums wiederhergestellt

Von der Explosion gibt es keine Video-Aufzeichnungen, aber als es hell wurde, war zu sehen, dass eine Platte in der Wand des Reaktorgebäudes, die als Sollbruchstelle vorgesehen war (Blow-out panel), von der Druckwelle heraus gebrochen worden war.

Auch in Block 3 wurde sofort nach dem Tsunami das RCIC gestartet, das ca.1 Tg lang den Kern Kühlte. Danach wurde mit dem Betrieb des HPCI ein weiterer Tag gewonnen. Dann aber erfolgte die geplante externe Einspeisung nicht schnell genug, um eine Kernschmelze zu verhindern. Die wesentlichen Ereignisse zeigt die Tabelle.

	Block 3
11.3. – 15:37	Ausfall der Notstromdiesel und der Kühlwasserversorgung
11.3. – 16:03	Start des passiven Kühlsystems RCIC
12.3. – 12:35	Das passive Sicherheitssystem HCPI wird gestartet
13.3. – 2:42	HCPI stoppt – Die Stromversorgung reicht nicht mehr
13.3. – 8:41	Beginn der kontrollierten Druckentlastung des Containments
13.3. – 9:08	Druckentlastung des RDB über die Abblaseleitung

13.3. – 9:25	Meerwasser-Einspeisung in die „fire protection line“ mit mobiler Pumpe
14.3. – 11:01	Explosion
22.3.	Stromversorgung des Kontrollraums wiederhergestellt

Das Bild zeigt die Explosion von Block 3.

Die Explosionen in den drei Blöcken haben auch die Fachwelt überrascht, da bislang niemand damit gerechnet hatte, dass sich innerhalb des Reaktorgebäudes ein explosives Wasserstoff-Luft-Gemisch bilden könnte. Man war immer davon ausgegangen, dass das Fehlen von Sauerstoff im Containment verhindert würde, dass sich so hohe explosionsfähige Konzentrationen irgendwo bilden können.

Der Plan war eigentlich, das Containment, wenn der Druck infolge der Wasserstoffgas-Produktion ansteigt, das Containment über das Containment Venting System zu entlasten und dabei das Wasserstoff-Stickstoff-Gemisch über den Kamin abzublasen. Dieses System war in allen Blöcken nachgerüstet worden, allerdings ohne ein Filtersystem, was bedeutet, dass mit dem Gas auch die im Gas vorhandene Radioaktivität freigesetzt wird.

Das Containment Venting System war ausgesprochen intelligent konzipiert, wie man an der Systemzeichnung sehen kann.

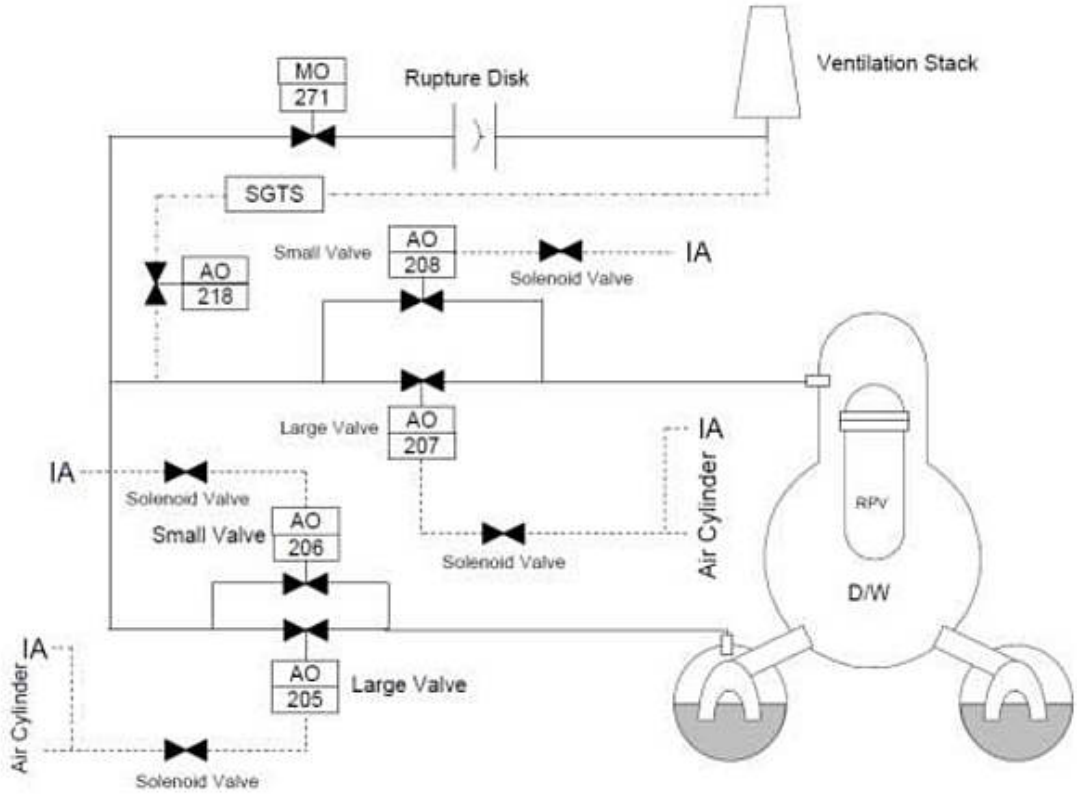


Figure IV-2-14 Overview of PCV Venting Facility (Units 2 and 3)

Das System besteht zunächst aus je einer Leitung aus dem Drywell und aus dem Wetwell. Jede Leitung verfügt über zwei parallel geschaltete Hauptventile (AO 205 – 208), die mittels Druckluft aus Drucktanks betätigt werden, also keinen Strom benötigen. Die Druckluftleitungen werden mit Magnet-Vorsteuerventilen geöffnet und geschlossen, die Batteriestrom benötigen. Als der Batteriestrom nicht zur Verfügung stand, wurden diese Ventile z.T. von Hand betätigt, was aber wegen der hohen Strahlung dann doch nicht erfolgreich war. Hinter den Druckluftventilen werden die Leitungen zusammen geführt und die Leitung führt zum Abluftkamin. Vor dem Abluftkamin befindet sich ein mit elektrischem Motor betriebnes Ventil, das offen steht und dazu dient, bei Bedarf die Leitung wieder zu schließen. Eine Berstscheibe stellt sicher, dass nur dann abgeblasen wird, wenn auch der vorgeschriebene Druck im Containment herrscht, ein einfache und zuverlässige Lösung.

Soweit das intelligente Konzept. Im Störfall zeigte es sich, dass diese Maßnahme sich viel schwerer durchführen ließ als geplant. Das Öffnen der Vorsteuerventile bereitete große Probleme und musste per Hand durchgeführt werden, dann war zuviel Druckluft verloren gegangen und die Ventile ließen sich nicht soweit öffnen wie geplant, aber

letztlich wurde in allen drei Blöcken diese Druckentlastung des Containments durchgeführt.

Ein immer noch offene Frage ist aber, wie der viele Wasserstoff in die 5. Etage der Reaktorgebäude gelangt ist. Sicher nicht aus dem Containment Venting System; einmal geöffnet stellt es eine leichten Strömungspfad in die Atmosphäre dar. Es muss also eine Pfad gegeben haben auf dem Hunderte von Kilogramm Wasserstoffgas in die 5. Etage gelangt sein müssen.

Ein Verdacht richtet sich auf das Containment Venting. Vermutet wird, dass dies bei der Druckentlastung des Containments geschehen ist, aber eine schlüssige Hypothese dazu gibt es bislang nicht.

Der zweite Verdacht richtet sich gegen die Dichtungen am stählernen Deckel des Drywells. Es wird unterstellt, dass er bei den erhöhten Drücken im Containment massiv geleckt hat. Dagegen spricht, dass das Containment jedes Jahr auf Dichtigkeit überprüft wird. Allerdings Fukushima in den 90er Jahren dabei ertappt worden, dass sie die Unterlagen zur Dichtigkeitsprüfung des Containments gefälscht hatten.

Es bleibt auch nach 2 Jahren immer noch ein Rätsel, wie der Wasserstoff in die 5 Etage gelangt ist.

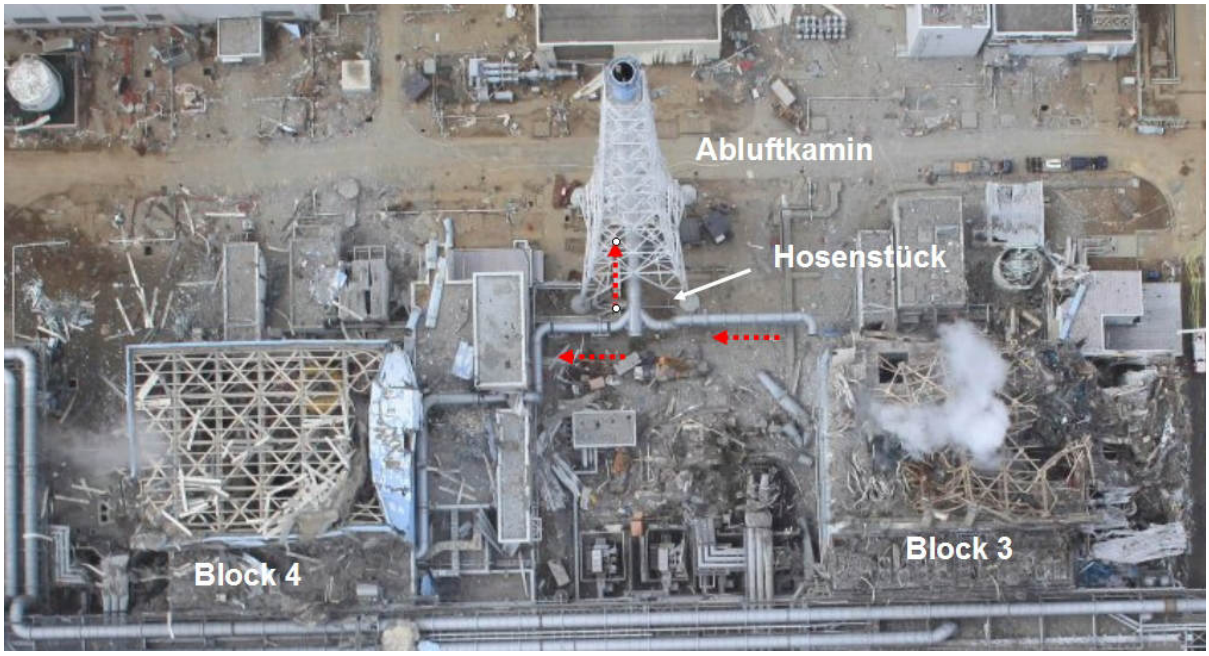
Aber es sollte noch schlimmer kommen: Am 15.3. um 6:10, also fast eine Tag nach dem Block 3 explodierte der Block 4, beim Tsunami abgeschaltet war. Der Kern war aus dem RDB geräumt und befand sich im Abklingbecken auf der 5. Etage, d.h. der Wasserstoff in Block 4 kann nicht aus einer Zirkon-Wasserdampf-Reaktion im Reaktor des Blocks 4 stammen.

Die Bilder zeigen die vier Blöcke nach den Explosionen.

(Block 1 rechts, Block 2 links)

(Block 3 links, Block 4 rechts)

Bislang wurden zwei Hypothesen für den Ursprung des Wasserstoffs aufgestellt:
1) Der Wasserstoff stammt aus dem RDB. In diesem Fall ist es unklar, wie er in das Reaktorgebäude gelangt ist. Eine schlüssige Vermutung auf welchem Strömungspfad dies passiert ist, gibt es bislang nicht. Besonderns schwierig ist es zu erklären, wie der Wasserstoff aus dem Block 3 in den Block 4 gelangt ist.
TEPCO propagiert die Hypothese, dass der Wasserstoff bei der Druckentlastung des Containments des Block 3 über die Abluftsysteme der beiden Blöcke in den block 4 gelangt ist. Beide Blöcke verfügen über einen gemeinsamen Abluftkamin. Vor dem eigentlichen Kamin werden die Rohleitungen der beiden Systeme in einem Hosenstück zusammen geführt. Hier könnte der Wasserstoff in den Block 4 gelangt sein.



Die Hypothese ist nicht plausibel und zwar aus drei Gründen:
- Die Hypothese unterstellt, dass die großen Mengen Wasserstoff-Stickstoff-Gemsich, die bei der Druckentlastung durch das Rohr strömten nicht auf direktem Weg in den Abluftkamin strömten sondern durch die viel engeren Rohren und Filter im Block 4 bis in die 5. Etage strömten.

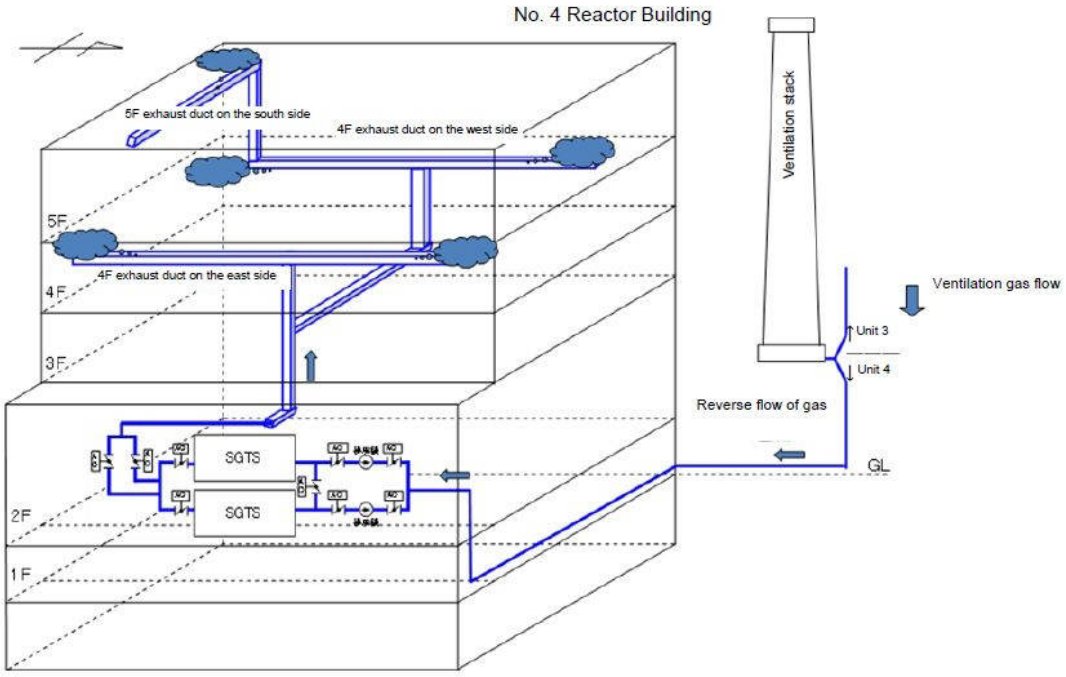


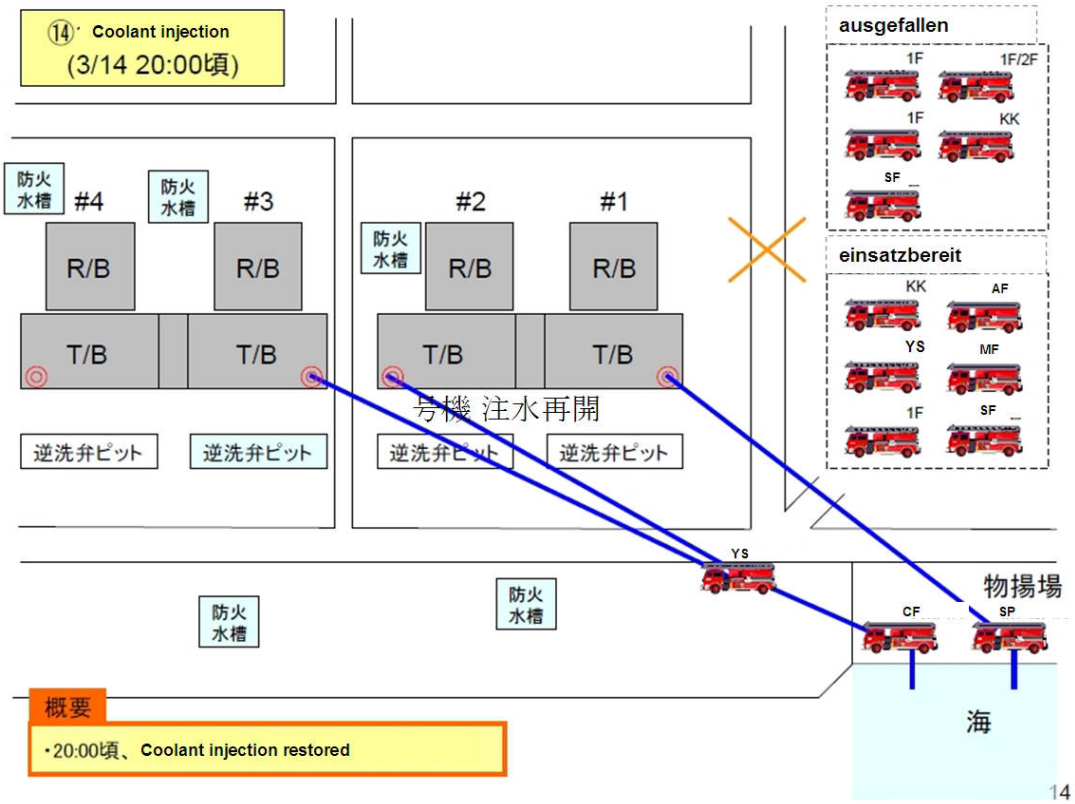
Fig. IV-5-10 Hydrogen flow route from Unit 3 to Unit 4 (estimated)

- Wie man auf dem vorigen Bild sieht, ist bei der Explosion des Block 3 die Abluftleitung abgerissen (gelber Kreis). Damit existiert nach der Explosion ein kurzer Strömungspfad von Block 4 ins Freie. Die Explosion in Block 4 ereignete sich 19 Stunden nach der Explosion in Block 3. Die Hypothese unterstellt also, dass 19 Stunden lang der leichtflüchtige Wasserstoff in Block 4 nicht auf diesem Weg wieder ausgeströmt ist.
- Um ein explosionsfähiges Gemisch aus Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff herzustellen benötigt man große Mengen von Wasserstoff, wie eine kurze Handrechnung zeigt. TEPCO hat es tunlichst vermieden, diesen Punkt durch Rechnungen auf Plausibilität zu untersuchen und schweigt dazu.

2) Die zweite plausible Hypothese ist, dass der Wasserstoff aus den Abklingbecken stammt, in denen infolge des Fehlens einer Anti-Syphon-Einrichtung durch Rückwärtsströmung durch die Einspeiseleitung der Wasserstand rasch sank, so dass es zu einer lokalen Überhitzung der Brennelemente unter Wasserstoffbildung kam. Erst nachdem diese zweite Hypothese veröffentlicht wurde, hat TEPCO Schaltbilder der Brennelementlagerbecken veröffentlicht, in denen Anti-Syphon-Einrichtungen eingezeichnet sind, in den früheren Veröffentlichungen waren sie nicht eingezeichnet. Deshalb sollte man skeptisch sehen, ob diese Einrichtungen wirklich existieren oder ob TEPCO hier Sachverhalte vertuschen will.

Nach den Explosionen installiert TEPCO die mobile Einspeisung mit Hilfe von Feuerwehrautos neu. Mittlerweile waren zahlreiche Feuerwehrautos auf dem Gelände eingetroffen und verfügbar. Am 14.3. um 20:00 waren in allen drei Blöcken die Einspeisung von Meerwasser als Kühlmittel durch mobile Geräte hergestellt worden.

Das Bild zeigt die Lage zu diesem Zeitpunkt.



Es waren also insgesamt 14 Feuerwehrautos auf dem Gelände, drei im Einatz, 6 in bereitschaft und die erstaunlich hohe Zahl von 5 war bereits ausgefallen. Diese Feuerwehrautos waren z.T. weit hergefahren und waren entweder Berufsfeuerwehren oder Betribsfeuerwehren aus anderen Kraftwerken:

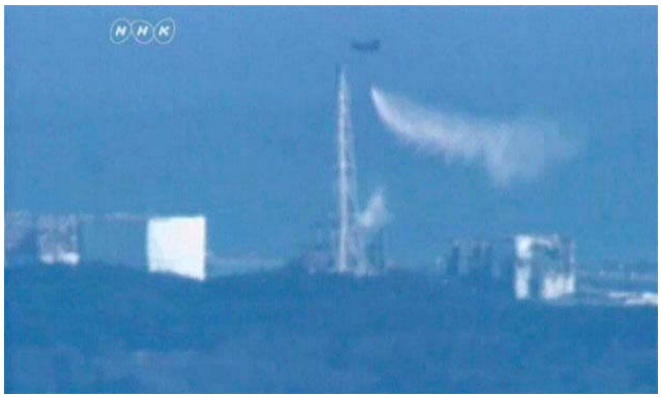
AF Anesaki Thermal Power Station, YS Yokohama South Fire Station, SF SelfDefense Forces, CF Chib Power Station, MF Municipal Fire Fighters, SP Sodegsura Power Station

Damit waren die Kernschmelze in den RDBs und Containments in einen vorläufigen sicheren Zustand überführt.

Damit blieb als großes Problem die Kühlung der Abklingbecken. Die Abklingbecken sind im Grunde große Schwimmbecken aus massivem Beton mit einer Stahlhülle innen. Sie sind auch ziemlich sicher, da alle Zu- und Ableitungen sich oben am Beckenrand befinden und sie nur bei einem Leck in Wand oder Boden oder bei Rückwärts-Strömung in einer Leitung leer laufen können. Die Abklingbecken enthalten große Mengen Wasser, so dass einige Tage ohne Kühlung auskommen.

Die Kühlung der Abklingbecken war durch den Tsunami ausgefallen und nach den Explosionen wurde festgestellt, dass der Wasserstand gesunken war. Durch die Explosionen standen die Abklingbecken der Blöcke 1, 3 und 4 mehr oder weniger im Freien.

In einigen spektakulären aber völlig sinnlosen Aktionen, die mehr fürs Fernsehen gedacht waren, wurde mit einem Hubschrauber Wasser über den Reaktoren abgeworfen, was natürlich gar nichts brachte. Nachdem sie in den Abendnachrichten weltweit waren, stellten sie die Hubschrauberflüge wieder ein.



Da wollte natürlich auch die Tokioer Feuerwehr nicht nachstehen und aus Tokio reisten extra "heldenhafte" Feuerwehrleute an, um mit den Feuerwehrspritzen irgendwie Wasser Richtung Abklingbecken zu spritzen. Auch sie reisten wieder ab, nachdem sie in den Fernsehnachrichten ausreichend gewürdigt worden waren. (20.3.2012)

Die Frage, warum die Betriebsfeuerwehr der Anlage nicht mit ihren eigenen Spritzen die Becken auffüllte, wurde nie gestellt. Am 22. 3. war eine stinknormale Betonpumpe, wie sie auf jeder größeren Baustelle eingesetzt wird, eingetroffen. Mit dieser Pumpe wurden dann die Abklingbecken endgültig aufgefüllt und auf Füllstand gehalten.

Damit war der eigentliche Störfall vorläufig beendet.

Das ist der Ablauf der Ereignisse, wie er sich heute darstellt. Es fehlen aber noch viele Fakten, um die Ereignissen abschließend zur beurteilen. Deshalb muss bezüglich der folgenden Aussagen die Einschränkung gemacht werden, dass sie nur nach dem aktuellen Wissenstand gültig sind.

Das Design des Systems zur kontrollierten Druckentlastung enthält schwer wiegende Design-Fehler. Das System ist nicht sauber getrennt sondern mit anderen Sicherheitssystemen vernetzt. Das System verfügt nicht über eine separate und redundante Stromversorgung und Leittechnik für den Fall eines totalen Stromausfalls, was bei einem "finalen" System der Fall sein sollte, und funktionierte erst nach Handeingriff. Das System verfügt über keine Filter. Das System stellt nicht sicher, dass Wasserstoffgas gefahrlos abgeblasen werden kann. (Design-Fehler Nr. 4)

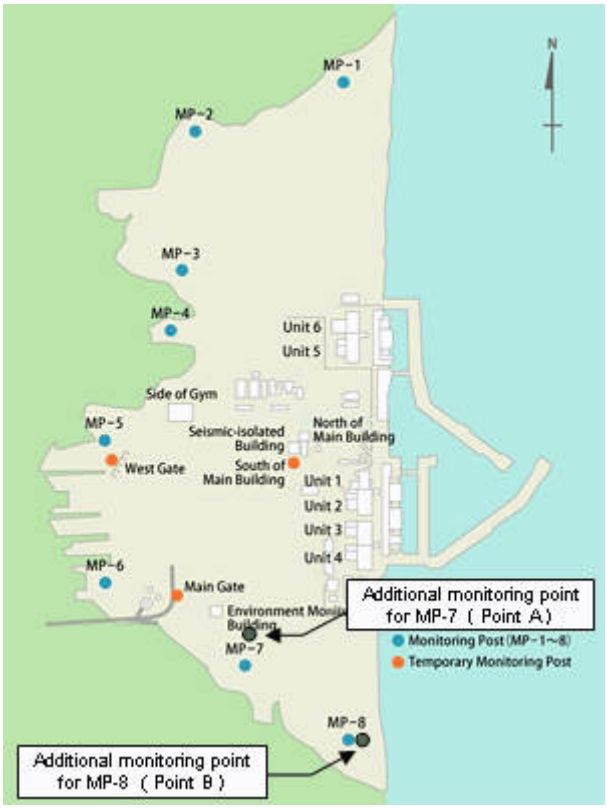
Die passiven Sicherheitseinrichtungen IC, RCIC und HPCI verfügen nicht über eine separate und redundante Stromversorgung und Leittechnik für den Fall eines totalen Stromausfalls. (Design-Fehler Nr. 5)

Die Abklingbecken verfügen nicht über ein eigenes separates und redundantes Kühlsystem für den Fall des Ausfalls der Reaktorkühlung sondern sind mit Reaktorkühlung vernetzt. (Design-Fehler Nr. 6)

Die Abklingbecken sind möglicherweise nicht mit Anti-Syphon-Einrichtungen ausgestattet, die wirkungsvoll eine Rückwärtsströmung in den Einspeiseleitungen verhindern. (Design-Fehler Nr. 7)

8 Die radioaktive Emission und Evakuierung

Die Überwachung der Freisetzung von radioaktivem Material aus einem Kernkraftwerk (Emission) gehört zu den wichtigsten Sicherheitsaufgaben. Im normalen Betrieb lassen sich die radioaktiven Emissionen gut überwachen: alle gasförmigen Emissionen gehen durch den Ablaufkamin, alle flüssigen Emissionen gehen durch den Abwasserkanal. Im Störfall können natürlich überall Leckagen auftreten. Um diese rechtzeitig zu entdecken, gibt es ein dichtes internes Netz von Überwachungseinrichtungen. Damit der Betreiber nicht die Behörde beschwindelt, wie einst im KKW Brunsbüttel, wo die schlaue Betriebsmannschaft schnell das Messgerät an einem Abblaseventil auf "Kalibrieren" schaltete, wird die Anlage von der Behörde mit ausgewählten Messstellen "fern überwacht". Dazu gibt es in der Anlage Fukushima acht Messstellen ("Monitoring points") und es wurden noch drei weitere zusätzlich eingerichtet. Die Lage dieser Messpunkte zeigt die Karte.



Diese Messstellen erfassen jeden Anstieg der Radioaktivität auf dem Anlagengelände

und alle radioaktive Wolken, die die Richtung Japan ziehen. Radioaktive Wolken, die Richtung offenes Meer ziehen, werden nicht erfasst. Es ist also der Fall nicht auszuschließen, dass eine radioaktive Wolke Richtung offenes Meer unbemerkt entweicht und dann später mit Winddrehung zurück zu den japanischen Inseln kommt.

Um im voraus abschätzen zu können, mit welcher radioaktiven Strahlenbelastung bei einem Störfall bei den Bewohnern außerhalb des Kraftwerks zu rechnen ist, benötigt man zunächst die Größe und Dauer der radioaktiven Emission.

Bei einem schweren Störfall mit Kernschmelze befindet sich zunächst alle Radioaktivität in den Brennstäben. Die Faustformel besagt, dass 10% sich im Spalt zwischen den Hüllrohren aus Zirkon und den festen Uranoxyd-Pellets (das sind kleine zylinderförmige Tabletten) befindet, 90% der Spaltprodukte sind im festen Uranoxyd eingeschlossen.

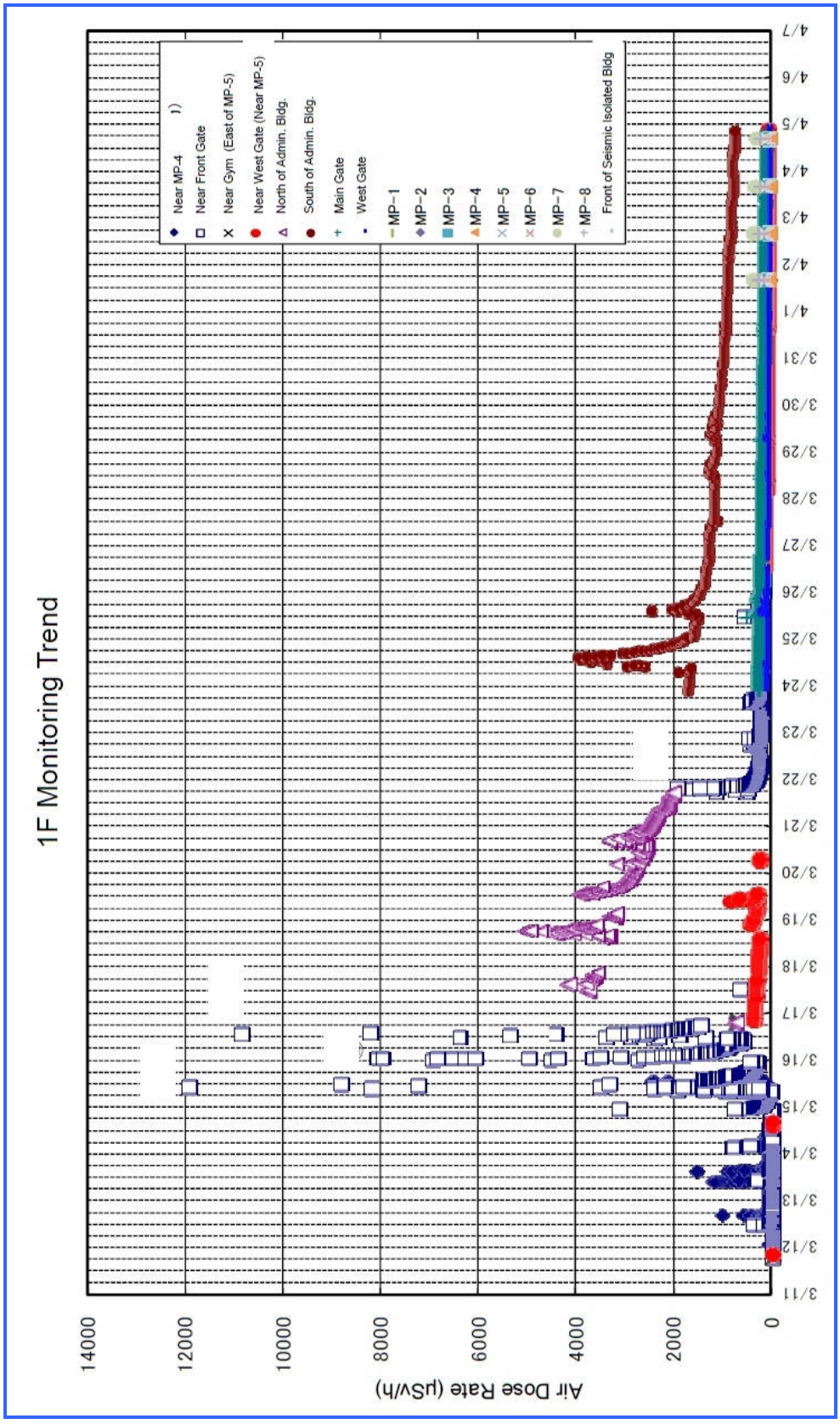
Wenn infolge der fehlenden Kühlung und der damit verbunden Überhitzung die Hüllrohre versagen und die Zirkon-Wasserdampf-Reaktion einsetzt, dann gelangen diese 10% der Spaltprodukte zusammen mit dem Wasserstoff zunächst in den RDB, über Leckagen oder kontrollierte Ableitung in das Containment, dann weiter in das Reaktorgebäude und schließlich in die Umwelt.

Erst wenn die Uranoxyd-Pellets bei 2500°C schmelzen, werden die übrigen 90% der Spaltprodukte freigesetzt. Wenn sich eine Wasserstoffexplosion im Reaktorgebäude ereignet, muss dies nicht zwangsläufig bedeuten, dass zu diesem Zeitpunkt auch die größten radioaktiven Emissionen erfolgen, da es durchaus sein kann, dass die meiste Radioaktivität sich noch in den noch nicht geschmolzen Uranoxyd-Pellets befindet.

Kurz und bündig: Die Explosionen sehen spektakulär aus, sie bedeuten aber nicht, dass damit auch richtig viel Radioaktivität freigesetzt wird.
Nicht alle Spaltprodukte nutzen die Gelegenheit, sich in die Umwelt zu verflüchtigen. Einige sind träge und verharren in der Schmelze, andere dagegen und dazu gehören die am meisten vorhandenen Spaltprodukte Jod und Cäsium sind ausgesprochen volatil und entweichen rasch aus dem Reaktorgebäude und bilden eine radioaktive Wolke, die ins Land zieht. Das Ganze muss man sich so vorstellen wie eine Rauchwolke bei einem Großbrand.

Die Messwerte an den "monitoring points" gehen nur Hinweise auf den Umfang und die Dauer der radioaktiven Emissionen aber keine zuverlässigen Angaben über die Gesamtmenge oder die Gefährlichkeit der freigesetzten Spaltprodukte.

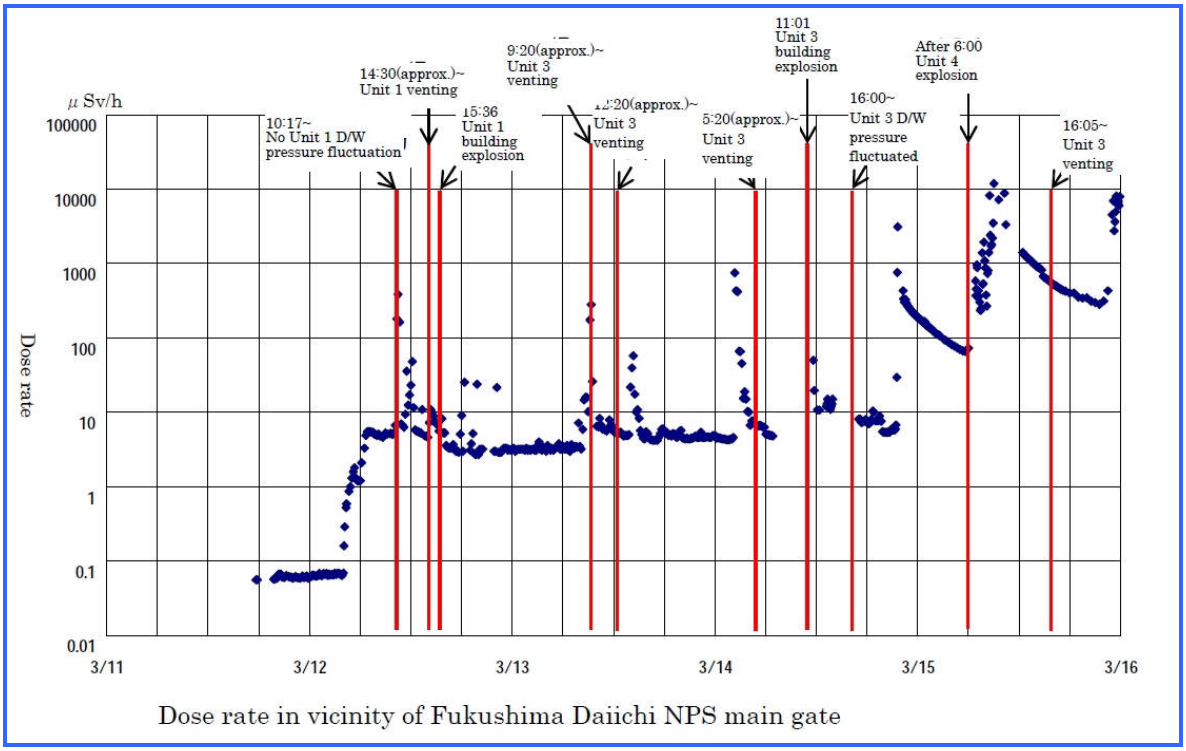
Das Bild zeigt die Meßwerte für die Gammastrahlung in der Luft am Messpunkt "main gate" in den ersten Tagen.



Die Messwerte zeigen sowohl den Strahlungspegel infolge von radioaktiver Ablagerung in unmittelbarer Nähe des Messpunkts als auch den Durchzug von radioaktiven Wolken: Das sind die Spitzen, die plötzlich auftreten und wieder absinken. Das Bild zeigt auch, dass die wesentlichen Freisetzungen zwischen dem 12. März und dem 26. März erfolgten. Die größten Emissionen waren am 15. und 16. März. Dieses Bild vom 15.März zeigt die Emission der radioaktiven Wolke, die Richtung Fukushima Stadt zog.

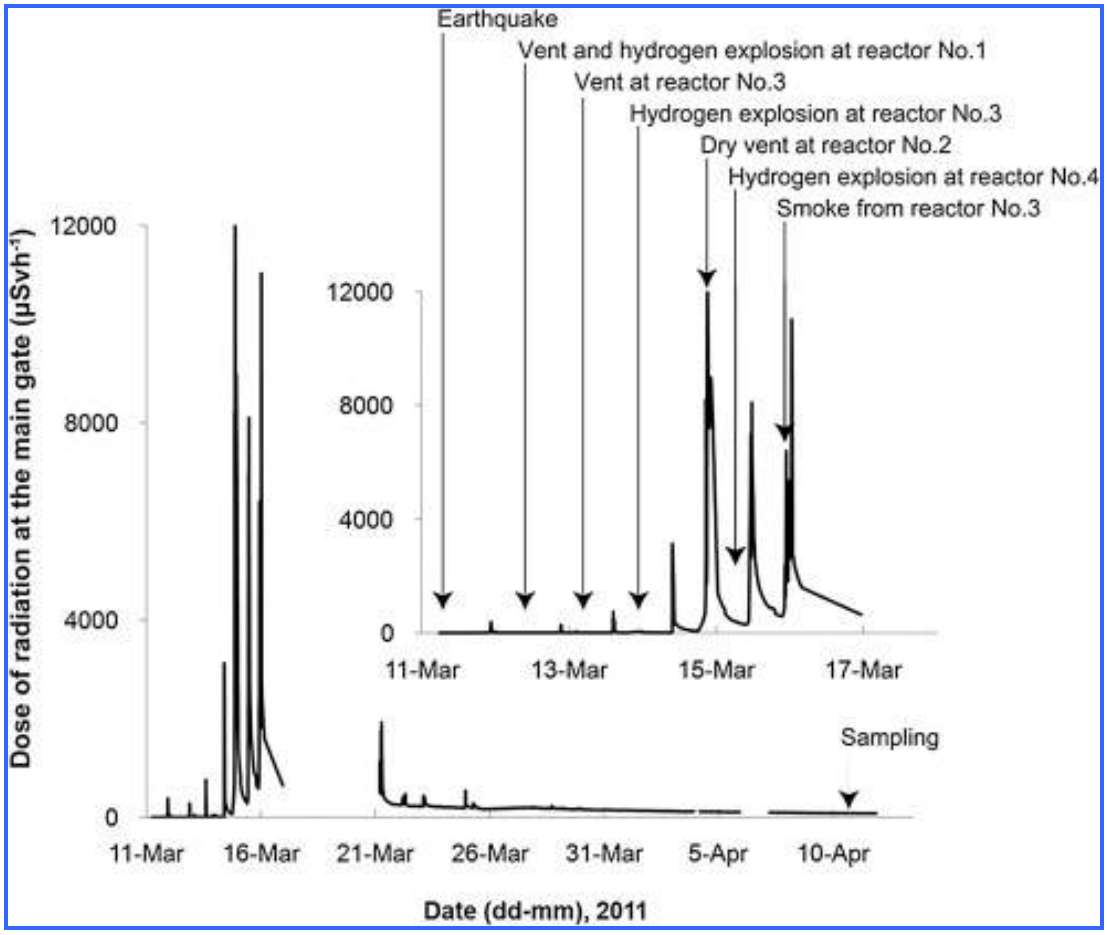
Man sieht auch, dass die Messstellen, obwohl sie im Abstand von hundert Metern stehen, unterschiedliche Strahlungspegel anzeigen, die von der direkten Ablagerung in der Nähe des Messpunkts und von der Windrichtung abhängen. Damit eine radioaktive Wolke erfasst wird, muss der Wind in Richtung Messpunkt wehen, genauso wie es bei einem Brand der Fall ist: Der Rauch zieht in Windrichtung ab.

Die Spitzen in den Messwerten lassen sich nicht - wie man spontan vermuten könnte - definierten Vorgängen in den Reaktoren wie "kontrollierte Druckentlastung des Containments oder Wasserstoffexplosion zu ordnen, wie das Bild zeigt.



Dose rate in vicinity of Fukushima Daiichi NPS main gate

Das nächste Bild zeigt die ausgewerteten Ergebnisse aus einer wissenschaftlichen Veröffentlichung. Es gab offensichtlich drei massive radioaktive Wolken und, dies zu einem recht späten Zeitpunkt, was aber plausibel ist, wenn man berücksichtigt, dass erst nach dem Schmelzen des festen Uranoxyds die Spaltprodukte mobilisiert werden und nach den Explosionen die Containments nicht mehr dicht waren und Undichtigkeiten aufwiesen.



Aus den Daten geht hervor, dass die Strahlenbelastung am Messpunkt "main gate" am 12.3. um 5:00 um den Faktor 100 anstiegt. Spätestens zu diesem Zeitpunkt war klar, dass die Kernschmelze in Block 1 eingesetzt hatte. Es lag ein totaler Stromausfall vor und die aktiven Notkühlsysteme arbeiteten nicht. Die passiven Sicherheitssysteme hatten von Anfang an nicht richtig gearbeitet und die mobile Einspeisung durch die Feuerwehr war nicht - wie geplant - innerhalb von 8 Stunden erreicht worden.

Völlig korrekt war schon am Abend vorher die Evakuierung in 3 km Umkreis angeordnet worden, aber jetzt wäre der Zeitpunkt gewesen, um in 20 km oder 30 km Umkreis zu evakuieren. Ziel der Evakuierung ist - zumindest nach Lehrbuch - die Menschen vor dem Durchzug der radioaktiven Wolke zu schützen. Grundsätzlich gilt dabei folgendes:

Regel 1: Je näher am Unfallreaktor, desto höher die Strahlenbelastung.

Regel 2: Die Strahlenbelastungen hängen vor allem von der Windrichtung ab und sind besonders hoch, wenn es beim Durchzug der radioaktiven Wolke regnet. Wenn man Glück hat und der Wind in die andere Richtung weht, dann kann man auch ganz nahe an der Anlage keine nennenswerte Strahlungsbelastung abbekommen. Es ist alles ein

Frage, wohin der Wind weht und ob es Niederschläge in Form von Regen oder Nebel gibt.
Die radioaktive Wolke, die bei einem Störfall mit massiver Freisetzung von Radioaktivität entsteht, unterscheidet sich nicht von einer Rauchwolke bei einem Großbrand. Sie zieht in Windrichtung und mischt sich dabei mit der Luft und wird dadurch verdünnt. So nimmt ihre Konzentration ab. Gleichzeitig fällt ein Teil der Radioaktivität zu Boden und kontaminiert den Boden. Die Strahlenbelastung ist beim Durchzug der Wolke am höchsten und es ist deshalb unbedingt erforderlich, während des Durchzugs der Wolke kurz nach dem Störfall in geschlossenen Räumen zu bleiben.

Die Strahlenbelastung aus der Wolke ("cloud shine") besteht vor allem aus Gamma-Strahlen, dagegen schützen am besten massive Häuser aus Beton, die japanischen Häuser sehen eher aus wie Leichtbauten, also kein besonders guter Schutz.

Es zeigt sich im nachhinein, dass es ein großer Fehler ist, keine festen Kriterien für die Anordnung zur Evakuierung vorzugeben, etwa "totaler Stromausfall" + "Ausfall der Kühlung" + "Überschreitung von Strahlungsgrenzwerten", sondern dass die Anordnung zur Evakuierung im Ermessen der Regierung lag, die einfach nicht wahr haben wollte, dass die drei Blöcke in Fukushima in einen schweren Störfall mit Kernschmelze und massiver radioaktiver Freisetzung liefen, und deshalb nicht entschlossen handelte.

Erst die Explosion in Block 1 hat dann die Regierung aufgeschreckt und zum Handeln gezwungen. Die Tabelle zeigt den zeitlichen Ablauf.

	Evakuierungsmaßnahmen
11.3. - 21:00	Anordnung Evakuierung 3 km-Radius
12.3. - 15:36	Explosion Block 1

12.3. - 17:39 Anordnung Evakuierung 10 km-Radius

12.3. - 18:25 Anordnung Evakuierung 20 km-Radius

14.3. - 11:01 Explosion Block 3

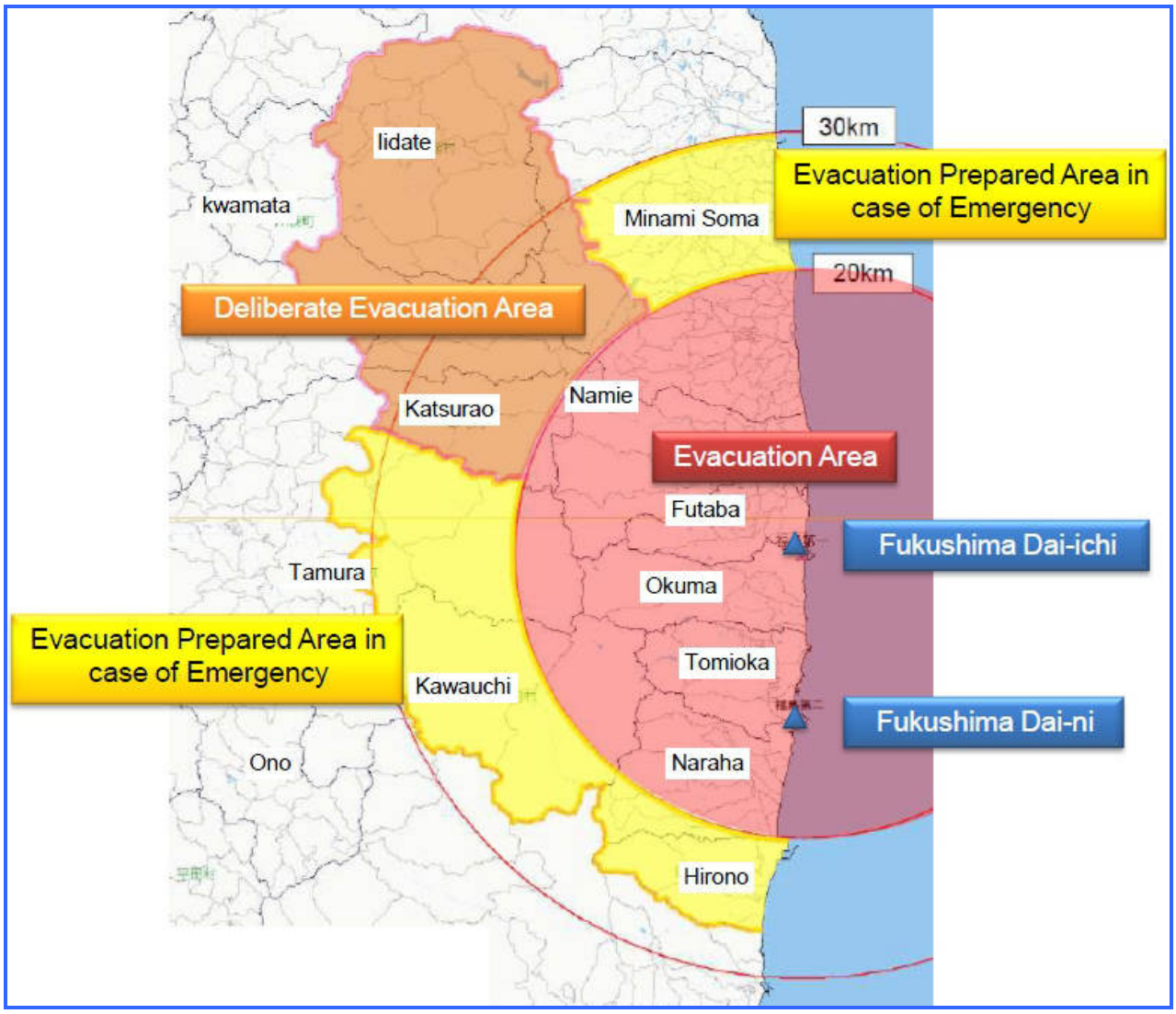
15.3. - 6:10 Explosion und vollständiger Druckabfall im Containment Block 2

15.3. - 6:10 Explosion Block 4

15.3. 11:00 Aufforderung im Haus zu bleiben für den Ring zwischen 20 und 30 km

25.3. im Ring 20-30 km freiwillige Evakuierung

22.4. Einrichtung der Sperrzone: 20-km Radius als Zone, deren Zugang nur mit Sondergenehmigung möglich ist. Der Ring von 20 bis 30-km wurde als "evacuation preparedness zone" eingerichtet, in dem die Bewohner ständig zur Evakuierung bereit sein sollen. Auch einige hoch belastete Zonen außerhalb des 20 km Radius wurden in die Sperrzone aufgenommen.



Die Evakuierung lief also genau in dem Zeitraum, in dem die größte radioaktive Freisetzung fiel. Mit etwas mehr Vernunft wäre das leicht zu vermeiden gewesen. Die Evakuierung darf nicht in das Ermessen von Politiker gestellt werden, die kein Risiko tragen und nicht zur Verantwortung für ihre Fehlentscheidungen gezogen werden.

Es ist ein schwerwiegender Fehler der Genehmigungsbehörde, dass sie keine klaren Kriterien für die Evakuierung auf der Basis der Störfallanalysen festgelegt hat. (Genehmigungsfehler Nr. 3)

Die Einrichtung der Sperrzone hätte sofort nach der Evakuierung erfolgen müssen, um die Verschleppung von Radioaktivität aus dem verseuchten Gebiet, wie z.B. der verseuchte Kies aus Namie, sofort zu unterbinden.

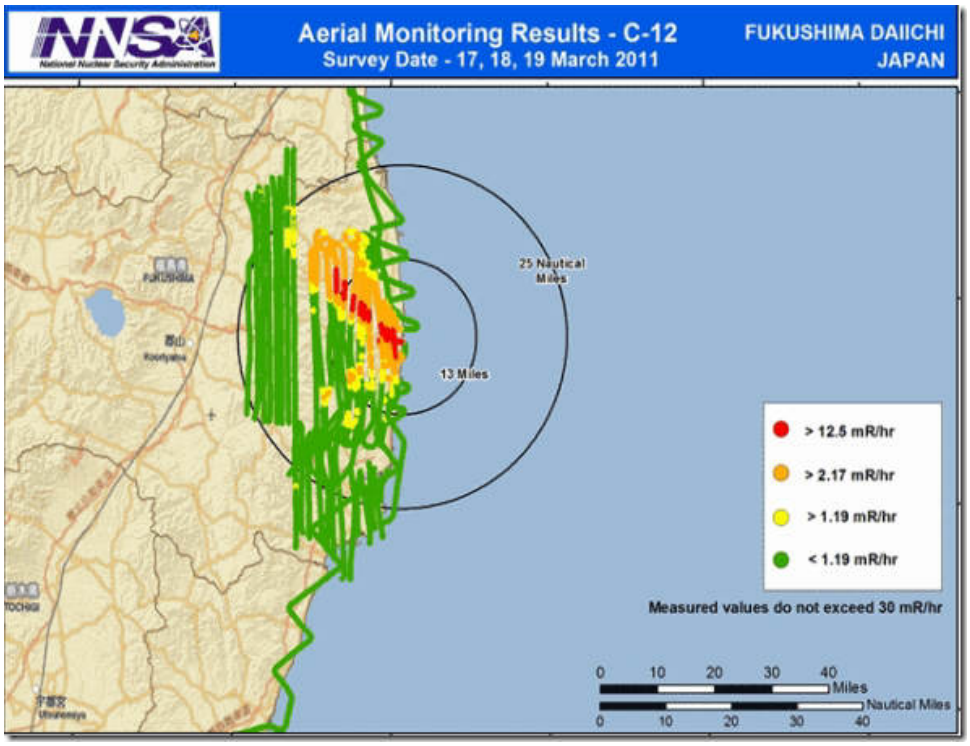
Es ist ein schwer wiegender Fehler der Genehmigungsbehörde, dass sie keine klaren Kriterien für die Einrichtung der Sperrzone festgelegt hat. (Genehmigungsfehler Nr. 4)

9 Die radioaktive Immission und die Strahlenbelastung

Wird Radioaktivität bei einem Störfall in einem Atomkraftwerk freigesetzt, dann zieht eine radioaktive Wolke in Windrichtung davon. Diese Wolke besteht mengenmäßig vor allem aus Jod 131 und Cäsium 134 und 137. Jod 131 hat eine Halbwertszeit von 8 Tagen, d.h. es zerfällt rasant und erzeugt dabei jede Menge Strahlung. Aber schon nach ein paar Wochen ist es weitgehend zerfallen. Cäsium 134 hat eine Halbwertszeit von 2 Jahren und Cäsium 137 von 30 Jahren. Es zerfällt also langsamer und sorgt für einen relativ konstanten Strahlungspegel.

Anfangs sah es so aus, als hätten die Japaner großes Glück: mit konstanten Westwinden zogen die radioaktiven Emissionen aufs Meer hinaus und da der Pazifik riesengroß ist, drohte auch keine allzu große Verseuchung. Dann wendet sich das Blatt: Am 15.März zog eine radioaktive Wolke Richtung Fukushima Stadt und am 21. März eine zweite in Richtung Ibaraki Stadt.

Das Bild zeigt die allererste flächendeckende Messung des Strahlungspegel und man sieht, dass zu diesem Zeitpunkt, die Kontamination durch die zweite Wolke am 19.März noch nicht erfolgt ist.



In jedem Lehrbuch der Reaktorsicherheit steht, dass radioaktives Material den Menschen auf fünf verschiedene Arten schädigen kann:

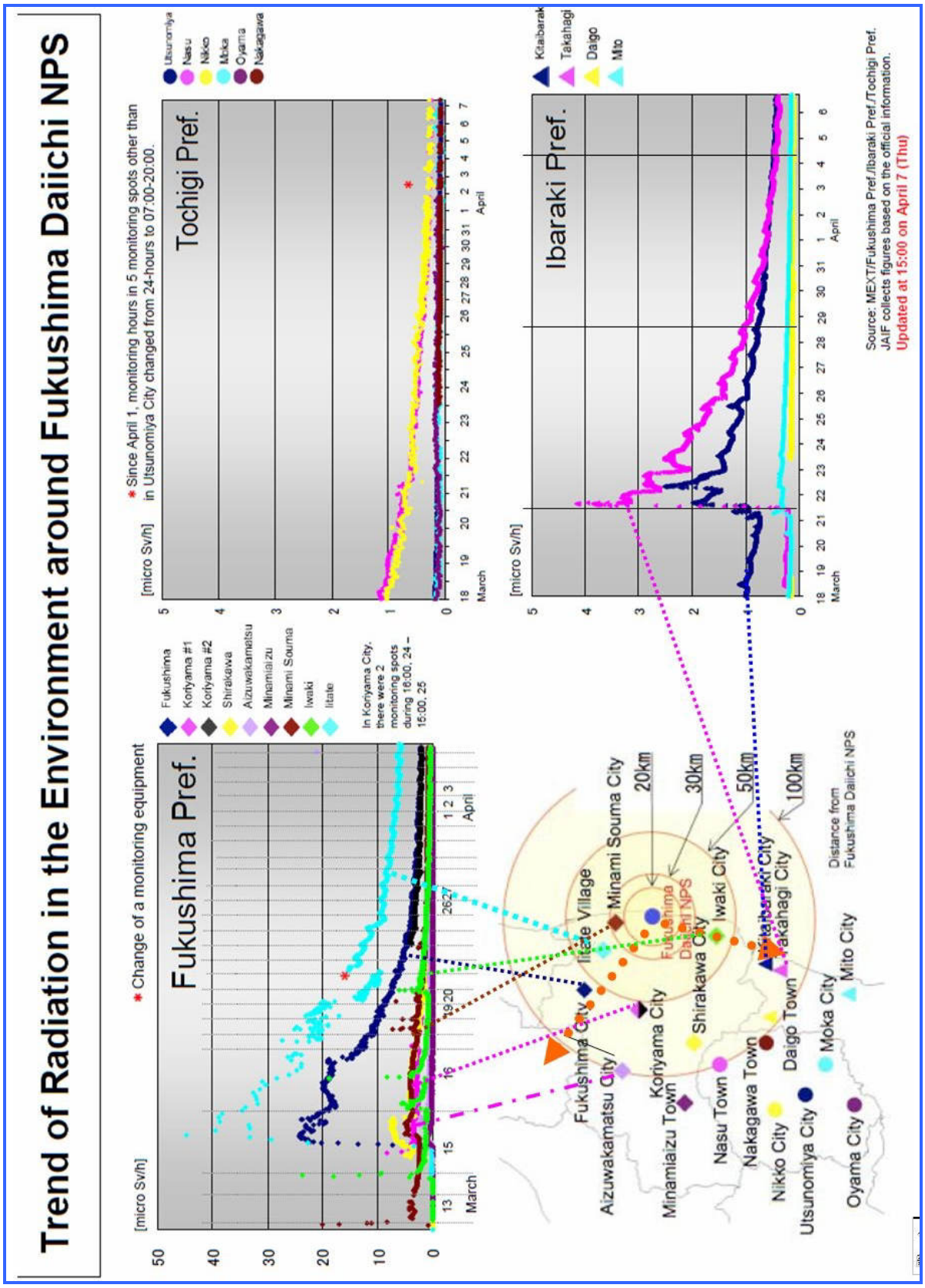
1. Cloud shine = Direkte Bestrahlung durch die radioaktive Wolke, davor kann man sich in Häuser schützen, vor allem in einem Keller aus Beton. Am besten aber: Rechzeitige Evakuierung
2. Ground shine = Direkte Bestrahlung durch Material, das sich am Boden befindet. Davor kann man sich nicht schützen, außer Evakuierung
3. Inhalation = Aufnahme durch Einatmen, davor schützt die Atemmaske, also keine Dauerlösung
4. Ingestion = Aufnahme mit der Nahrung, davor schützt "nichts essen", also auch keine Dauerlösung, und ganz wichtig keine radioaktiv belastete Nahrung essen, wenn man sich außerhalb der Gefahrenzone befindet.
5. Oberflächliche Kontamination, davor schützt die Schutzkleidung, sonst gilt Kleidung wechseln und duschen.

Von den beiden erwähnten Isotopen kann man sich gut gegen Jod schützen, indem man rechtzeitig Jodtabletten einnimmt. Diese blockieren die Jod-Aufnahme in den Körper. Jod sammelt sich in der Schilddrüse, die Folge ist dann Schilddrüsenkrebs. Leider reagierte die japanische Regierung zu zögerlich. Erst am 21. März, also 6 Tage nach der großen radioaktiven Wolke ordnete sie die Einnahme von Jodtabletten für alle Anwohner in 50 km Umkreis an.

Die radioaktive Wolke, die bei einem Störfall mit massiver Freisetzung von Radioaktivität entsteht, unterscheidet sich nicht von einer Rauchwolke bei einem Großbrand. Sie zieht in Windrichtung und mischt sich dabei mit der Luft und wird dadurch verdünnt. So nimmt ihre Konzentration ab. Gleichzeitig fällt ein Teil der Radioaktivität zu Boden und kontaminiert den Boden. Die Strahlenbelastung ist beim Durchzug der Wolke am höchsten und es ist deshalb unbedingt erforderlich, während des Durchzugs der Wolke kurz nach dem Störfall in geschlossenen Räumen zu bleiben.

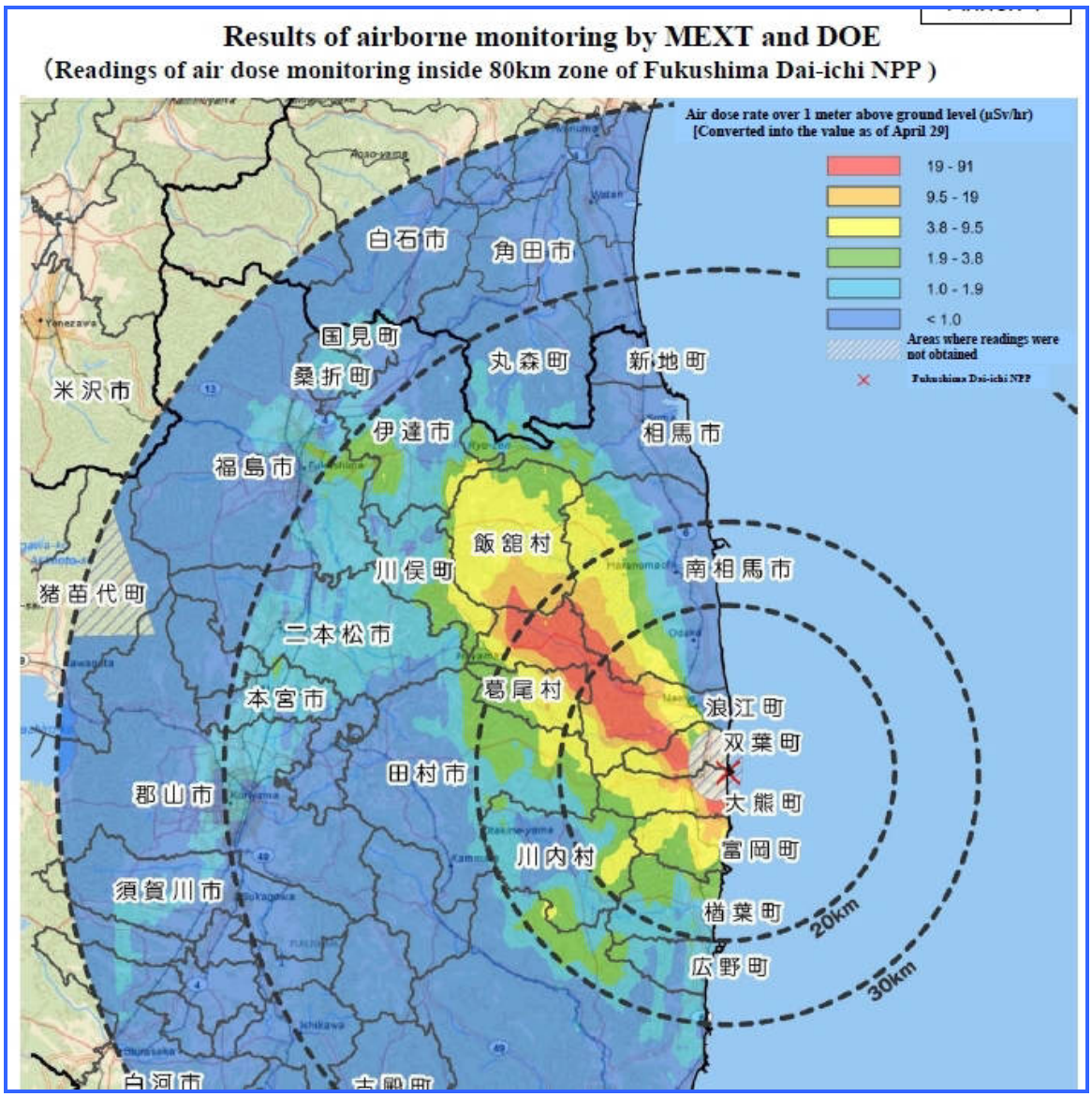
Falls es regnet, werden die radioaktiven Atome regelrecht ausgewaschen und der Boden wird viel stärker verseucht als ohne Regen. Das Ergebnis dieser Prozesse ist also keine gleichmäßige Verteilung um das Kraftwerk herum sondern ein ungleichmäßiger Flickenteppich. Gebiete in größerer Entfernung können viel schwerer getroffen werden als Gebiete direkt am Kraftwerk.

Das Bild zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Strahlungspegel in Städten in 80 km Umkreis um die Anlage.



Die beiden schon erwähnten radioaktiven Wolken vom 15. März und vom 21. März sind mit gestrichelten orange Pfeilen eingezeichnet.
Die japanische Regierung tat in den ersten Tagen alles, um das Ausmaß der Katastrophe zu verheimlichen und fing erst recht spät an, systematische Messungen zu veröffentlichen. Als die ersten Informationen über verseuchte Nahrungsmittel aufkamen, versuchte sie noch die Bevölkerung mit törichten Aktionen für dumm zu verkaufen. Das Bild mit Kabinettschef Edano, der angeblich eine Tomate aus der verseuchten Ernte in Fukushima isst, ging um die Welt.

Erst Anfang Mai gab es die ersten zuverlässigen flächendeckenden Messungen von MEXT, die die Strahlenpegel in der näheren Umgebung der Anlage zeigen. Die Messungen zeigen, dass die höchsten Strahlungspegel nicht mit den Evakuierungszonen übereinstimmen und auch außerhalb der 20 km Zone Gebiete liegen, die evakuiert werden sollten. Spätestens jetzt hätte man die Evakuierungszone anpassen müssen, was aber nicht erfolgte.



Als Faustformel gilt, dass in einem Abstand von 20 oder 30 Kilometern nach Durchzug der Wolke keine erhebliche Gefahr mehr besteht. Man kann sich dort kurzfristig aufhalten, ohne Gesundheitsschäden befürchten zu müssen, aber man kann dort nicht mehr dauerhaft leben, da sich die Belastung mit der Zeit aufsummiert. Der Schadensmechanismus der niedrigen Strahlung besteht darin, dass die Belastung direkt von der Zeitdauer, der man der Strahlung ausgesetzt ist, abhängt. Wer sich ein Jahr lang an so einem Ort aufhält, erleidet eine Belastung, die 365-mal so groß ist, als wenn er sich nur einen Tag dort aufhält. Ein Tag macht noch keinen Schaden aber ein Jahr oder 10 Jahre sehr wohl.

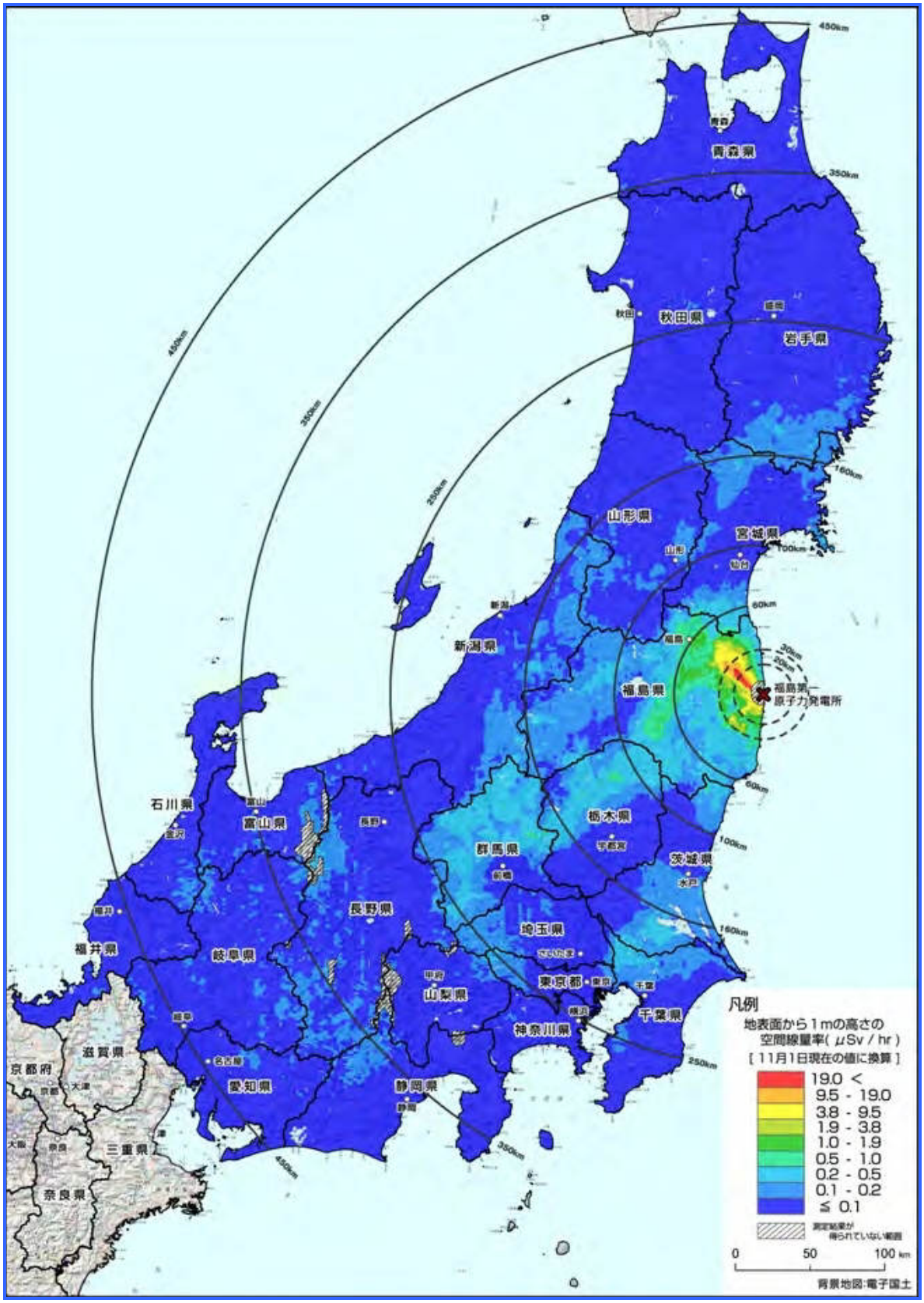
Die Karte zeigt, dass sich die nennenswerte Strahlenbelastung in Japan auf die Umgebung des Kraftwerks bis 80 km beschränkt, aber dort sehr ungleichmäßig verteilt ist.

Insbesondere wurde das Gebiet in Richtung Fukushima City stärker belastet. In Richtung Tokio dagegen und für Tokio selber ist keine nennenswerte Belastung vorhanden (hell und dunkel blau).

Um aus den Messwerten in der MEXT Karte die Jahreswerte zu ermitteln, muss man die Messwerte in [mikro Sv/h] mit 8.4 multiplizieren um die Jahresdosis in [mSv/y] zu erhalten. Der Spitzenwert beträgt ca. 60 mSv/y und der deutsche Grenzwert liegt bei 100 mSv/y. Ab 100 mSv/y muss in Deutschland abgesiedelt werden. Aufgrund dieser Werte ist die Strahlenbelastung in einigen Städten außerhalb der Evakuierungszone, dazu gehört auch Fukushima City.

Wegen der starken Schwankung der Strahlenbelastung innerhalb weniger Meter, kann nur eine direkte Messung am Menschen ermitteln, wie hoch seine individuelle Belastung ist. Deshalb wurden an die 380.000 Schüler in der Präfektur Fukushima sollen Ende Juni Dosimeter ausgegeben. Diese könne natürlich nicht die bis dahin erfolgte Belastung ermitteln. Dosimeter bieten keinen Schutz vor der radioaktiven Strahlung, sondern sie erfassen die Strahlungsmenge, die man abbekommen hat. Das macht im beruflichen Einsatz Sinn, da Mitarbeiter, deren Belastung sich den Grenzwerten nähert, nicht mehr eingesetzt werden. Aber was wollen die Behörden mit Einwohnern machen, deren Belastungswerte sich den Grenzwerten nähern? Das Ganze war und ist eine reine psychologische Maßnahme, die vor allem den Herstellern der Dosimeter nutzt.

Zu den wichtigsten Maßnahmen der Schadensbegrenzung nach einem schweren Störfall gehört die flächendeckende Erfassung der radioaktivem Kontamination des gesamten Lande, um sicher zustellen, dass nicht in weiter abgelegenen Gebiete auch massive radioaktive Niederschläge erfolgten. Es dauerte jedoch über ein halbes Jahr, bis MEXT alle Gebiete ausgemessen hatte, die nennenswert mit Cäsium aus dem Störfall belastet sind. Die Karte zeigt die Werte von.



Zu diesem Zeitpunkt ist das Jod schon weitgehend zerfallen. Außer Jod und Cäsium kann die radioaktive Wolke auch weitere Spaltprodukte enthalten, je nachdem was bei

der Emission freigesetzt wurde. Diese Spaltprodukte sind mengenmäßig sehr viel geringer aber können aufgrund ihrer biologischen Wirksamkeit große Probleme darstellen, z.B. Plutonium. Danach wurde auch gesucht, aber es wurden nur so geringe Mengen gefunden, die aus Sicht des Strahlenschutzes kein Problem darstellen.

Schon Ende März wurden die ersten radioaktiv verseuchten Lebensmittel entdeckt und auch Verkaufsverbote ausgesprochen. Das ging - wie auch alle anderen Maßnahmen zur Schadensbegrenzung, die die japanische Regierung ohne Verzug sofort hätte ergreifen müssen - sehr schleppend und es wurde immer erst gehandelt, wenn nichts mehr zu verheimlichen oder zu vertuschen war. Ein vorbeugendes Handeln, was zur Schadensbegrenzung unabdingbar ist, gab es nicht.

Nach und nach wurden immer mehr belastete Lebensmittel entdeckt und erst dann hat die japanische Regierung mit Handelsbeschränkungen reagiert. Erst seit Ende 2011 betreibt die japanische Regierung eine aktive vorbeugende Politik und hat mittlerweile die Grenzwerte drastisch herabgesetzt.

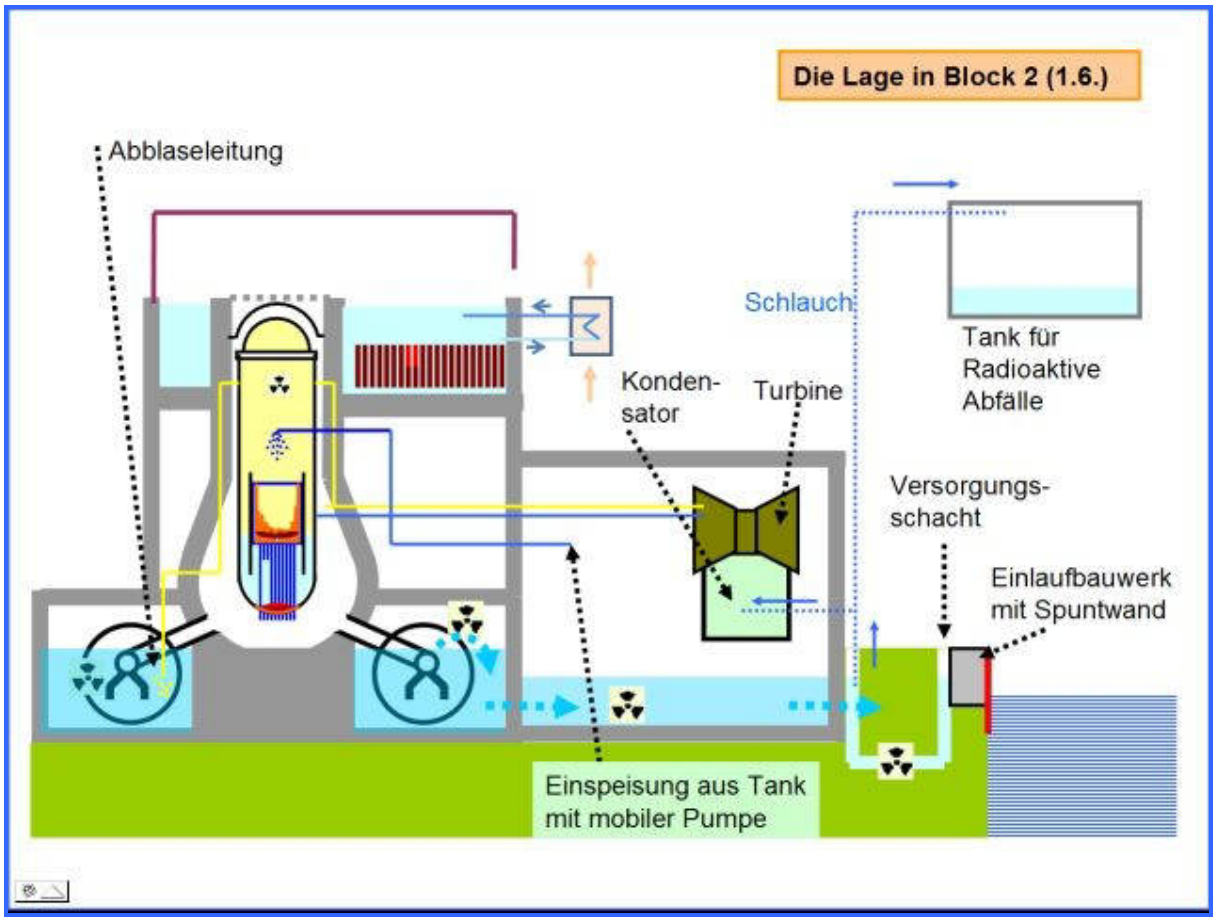
Ab 1. April 2012 gelten in Japan neue, vorbildlich niedrige Grenzwerte für die radioaktive Belastung von Lebensmitteln:
100 Bq/kg Cäsium für normale Lebensmittel wie Fleisch, fisch und Gemüse
50 Bq/kg für Milch und Säuglingsnahrung
10 Bq/kg für Trinkwasser

Ganz anders in der EU und Deutschland:
Für Lebensmittel und Lebensmittelimporte gelten für Cäsium-134 und Cäsium-137 üblicherweise Höchstwerte von 370 Becquerel/Kilogramm für Säuglingsnahrung und Milchprodukte sowie von 600 Becquerel/Kilogramm für andere Nahrungsmittel (EU-Verordnung 733/2008).
Mit der nach Fukushima erlassenen Eilverordnung 297/2011 hat die Europäische Kommission die Grenzwerte für Produkte aus den betroffenen japanischen Regionen auf 400 Becquerel/Kilogramm für Säuglingsnahrung, auf 1000 Becquerel/Kilogramm für Milchprodukte und auf 1250 Becquerel/Kilogramm für andere Nahrungsmittel heraufgesetzt.

10 Schadensbegrenzung und Aufräumarbeiten

Die Installation einer provisorischen Kühlung für die drei geschmolzenen Reaktoren und die vier Abklingbecken Ende März stellt das Ende der massiven radioaktiven Freisetzung dar. Das Anlagengelände war so stark verseucht, dass Arbeiter sich nur kurzfristig dort aufhalten konnten, aus den Gebäude trat auf dem Luftweg weiter Radioaktivität aus und Anfang April entdeckten Arbeiter bei Erkundungs- und Aufräumarbeiten, dass die Kelleräume der Reaktorgebäude und die Schächte des Meerwasserkühlkreis bis zu den Einlaufbauwerken meterhoch voll mit hoch radioaktiver Brühe standen. Eine böse Überraschung war, dass durch ein Leck in einem Schacht erhebliche Mengen dieser Brühe ins Meer flossen. Mit Hochdruck wurden dieses Leck und die Einlaufbauwerke abgedichtet, wodurch die radioaktive Freisetzung ins Meer reduziert wurde.

Erst nach den Abdichtarbeiten wurde die Einleitung von hoch radioaktivem Wasser ins Meer unterbunden.



Die Maßnahmen des ersten Jahres dienten folgenden Zwecken:

1) Begrenzung der weiteren Freisetzung von Radioaktivität aus der Anlage

Im ersten Jahr wurden zahlreiche Maßnahmen durchgeführt, um die Radioaktivität auf dem Anlagengelände zu binden und die Freisetzung in die Luft und ins Meer zu senken:

- Beseitigen und sichere Lagerung der radioaktiv verseuchten Trümmer
- Beschichtung der hoch kontaminierten Flächen mit einem Kunststoffspray (In Chernobyl hieß die Flüssigkeit "Pampe")

- Provisorisches Verschließen alle nicht benötigten Öffnungen in den Reaktor- und Turbinengebäuden
- Errichtung einer Zelt-Konstruktion über dem Block 1. Warum dies nicht auch in Block 3 und 4 gemacht wurde, wurde nie erläutert.

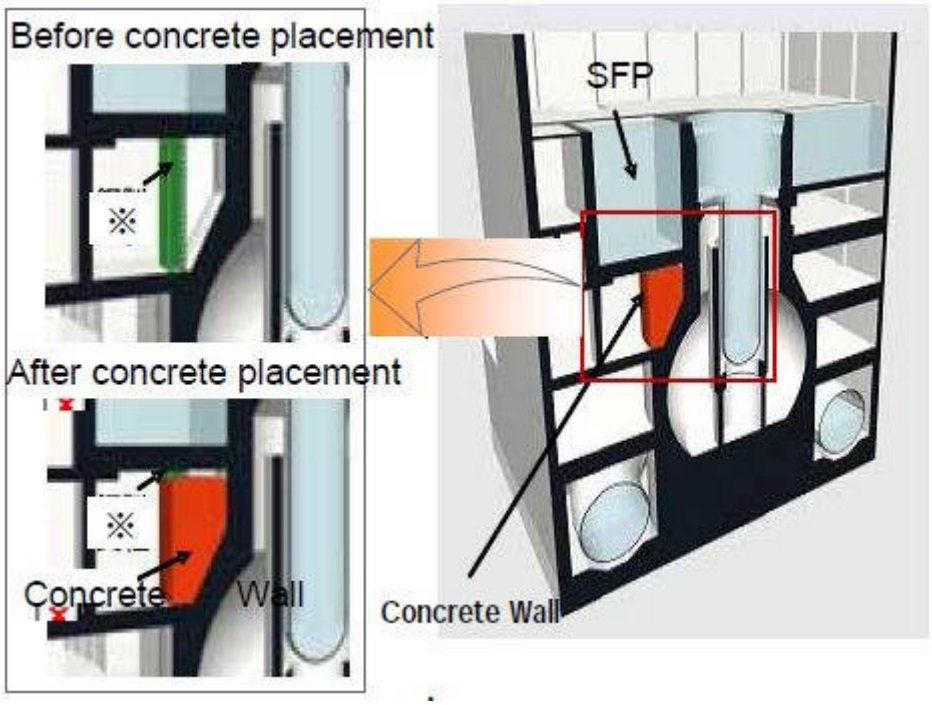
2) Stickstoff-Einspeisung

Auch nach Installation der mobilen Kühlung ist die Gefahr von weiteren Wasserstoffexplosionen nicht gebannt. Durch Radiolyse kann sich im RDB oder Containment erneut ein explosives Wasserstoff-Luft-Gemisch bilden. Durch Einspeisen von Stickstoff kann man verhindern, dass dieses Gemisch explosionsfähig wird. Deshalb wurde in die Containments der Blöcke 1, 2 und 3 immer wieder Stickstoff eingespeist.

3) Schutz vor erneuten Erdbeben und Tsunamis

- Da der Tsunami die Molen des Hafenbeckens zerstörte hatte, wurden sie rasch wieder errichtet und verstärkt.

- Der Boden des Abklingbeckens in Block 4 wurde massiv mit Beton verstärkt. Warum dies erfolgte, wurde nie begründet. Die Arbeiten waren überhaupt nur möglich, da das Reaktorgebäude des Blocks 4 nicht so massiv verseucht war wie die Reaktorgebäude der Blöcke 1,2 und 3.



- Für alle provisorischen Kühlsysteme wurden Ersatzsysteme bereitgestellt und die Installation dieser mobilen Ersatzsysteme geübt.

4) Dekontamination des hoch radioaktiv verseuchten Wassers in den Kellerräumen. Ende März, als von der mobilen Kühlung mit Meerwasser auf die mobile Kühlung mit Frischwasser umgestellt wurde, wurde auch entdeckt, dass sich in den Kellerräumen von Reaktor- und Turbinengebäuden und den angeschlossenen Schächten ca. 80.000 m3 hoch radioaktiv verseuchtes Wasser befand.

Um dieses abzupumpen und zu entsorgen, wurden zwei Dekontaminationsanlagen bis Mitte des Jahres 2011auf dem Anlagengelände errichtet. Danach wurde als Kühlwasser vorzugsweise gereinigtes Wasser aus den Kellerräumen verwendet und die Kühlung erfolgte im offenen Kreislauf. Gereinigtes Wasser wurde in die Reaktoren eingespeist und floss als hoch radioaktiv verseuchtes Wasser durch Lecks in das Containment und von dort durch Lecks in die Reaktorgebäude. Seit Mitte letzten Jahres werden täglich so etwa 500 m3 eingespeist und von gereinigtem Wasser wieder in hoch kontaminiertes Wasser umgewandelt.

Als der Wasserspiegel in den Gebäuden unter den Wasserspiegel des Grundwassers um die Gebäude abgesunken war, entdeckt TEPCO eine böse Überraschung, nämlich dass Grundwasser mit ungefähr 400 m3 am Tag in die Kellerräume eindringt. Vermutlich sind sie infolge des Erdbebens nicht mehr dicht.

Es ist ein schwer wiegender Design-Fehler, dass die Anlage im Grundwasser steht und der Grundwasserspiegel nicht deutlich unter der Bodenplatte der Anlage liegt und auch kein System zur Kontrolle des Grundwasserspiegels vorhanden ist. (Design-Fehler Nr. 8)

Um eine weitere Kontamination des Grundwassers zu verhindern, versucht TEPCO den Wasserspiegel in den Kellerräumen unter dem Wasserspiegel des Grundwassers zu halten.

Um zu verhindern, dass verseuchtes Grundwasser in das Meer gelang, wurde von TEPCO der Bau einer Spundwand angedacht. Mit dem Bau wurde aber im erst im 2. Jahr begonnen.

TEPCO hat bislang noch kein Konzept, was es mit dem eindringenden Grundwasser machen soll und wie das weitere Eindringen beendet werden soll. Nach zwei Jahren hat TEPCO ca. 200.000 m3 gereinigtes aber immer noch radioaktiv belastetes Wasser in Tanks auf dem Gelände gespeichert und baut eifrig weitere Tanks. Dasselbe gilt für die radioaktiven Filterrückstände, die ebenfalls in Tanks wegen der Strahlung hinter dicken Betonwänden auf dem Gelände bis auf weiteres gelagert werden.

5) Ersatz für die mobile Einspeisung

Für die vier Abklingbecken wurde geschlossenen Kühlkreisläufe installiert: Das Abklingbeckenwasser wird aus dem Überlauftank ("skimmer tank") entnommen, über einen zweiten Kühlkreis, der mit einem Luftkühler arbeitet, gekühlt, gefiltert und wieder eingespeist.

Das Bild zeigt den Luftkühler.

Die Kühlung der drei geschmolzenen Reaktorkerne erfolgt wie oben beschrieben. Das ist natürlich keine Dauerlösung aber solange die Lecks in den Containments nicht abgedichtet sind, ist keine andere Lösung möglich. Arbeiten an den Lecks dürften sehr schwierig sein, da das herausleckende Kühlwasser stark radioaktiv verseucht ist.

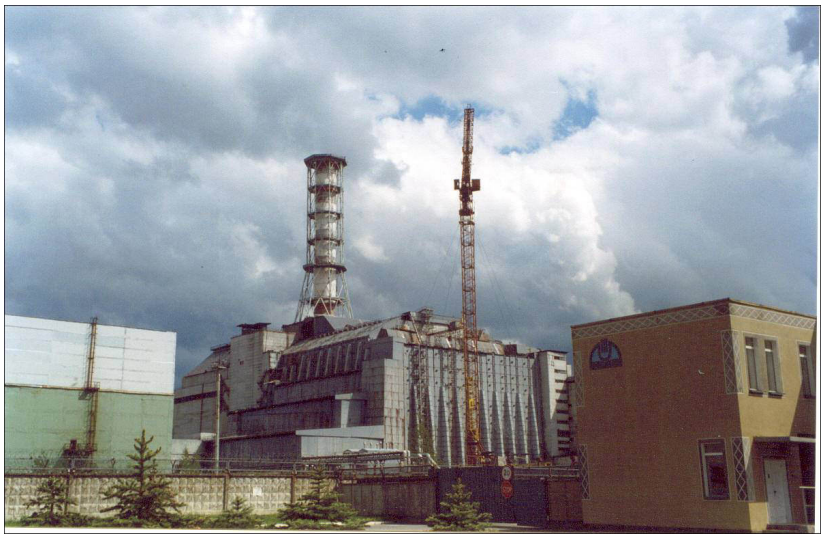
6) Fortschritt im zweiten Jahr

Die Aufräumarbeiten auf dem Gelände gehen seit dem ersten Jahr nur noch im Schneckentempo vorwärts. Man könnte von der Erfindung der Langsamkeit sprechen, aber solange nicht das Brennelement-Lagerbecken von Block 4, in dem ein vollständiger Kern mit Unmengen von Spaltprodukten im Freien steht, geht von der Anlage noch immer eine große Gefahr aus, diese Gefahr ist jedenfalls größer als alle Gefahren, die von einem in Betrieb befindlichen Atomkraftwerk ausgehen. Ein größeres Erdbeben oder ein sonstiges unerwartetes Ereignis kann leicht zur Katastrophe führen. Deshalb ist es unverantwortlich mit welcher Langsamkeit TEPCO diese Problem angeht. Am Ende des zweiten Jahres stehen erst die ersten Stützen für die Teileinhausung des Blockes 4, die eine Voraussetzug für den Abtransport der Brennelemente aus dem Lagerbecken ist.

Auch andere wichtige Maßnahmen, wie die Spuntwand zum Meer, um zu verhindern dass kontaminierte Wasser ins Meer gelangt, ist erst im Bau, dasselbe gilt für die Maßnahmen zur Grundwasserabsenkung.

Das langsame Vorgehen von TEPCO steht im krassen Gegensatz zu den Notfallmaßnahmen nach Tchernobyl.

Die Bilder zeigen Tchernobyl direkt nach der Katastrophe und 6 Monate später.



IM Vergleich dazu Fukushima direkt nach der Katastrophe und 2 Jahre später. Die Bilder sprechen für sich und bedürfen keines Kommentars.

7) Dekontaminationsmaßnahmen in den verseuchten Gebieten Japans.

Von Anfang an hat die japanische Regierung und TEPCO versucht die Bevölkerung für dumm zu verkaufen und die Katastrophe und ihre Folgen klein zu reden und kostspielige Maßnahmen zur Schadensbegrenzung zu vermeiden. Selbst als nach den spektakulären Explosionen nichts mehr zu verheimlichen war, hielt sie daran fest, dass alles nicht so schlimm sein und erst einen Monat nach der Katastrophe räumte die japanische Regierung ein, dass es sich um einen schweren Störfall der Kategorie 7 auf der INES-Skala handelt, nachdem sie eine Monat lang darauf beharrte hatte, des es nur ein Unfall der Kategorie 4 sei. Erst am 7. Juni räumte sie dann ein, dass sich in allen Rektoren eine Kernschmelze ereignet hat.

Dieses Verhalten der Behörden hatte natürlich Folgen: Die cleveren und jüngeren in der Bevölkerung machten sich rasch vom Acker. Zurückblieben diejenigen, von denen in der Bibel stehen würde, dass Gott sie weniger lieb hatte. Diese Leute versuchten sich mit dem Leben in ihrer verseuchten Heimat zu arrangieren und griffen zu allerlei skurrilen Maßnahmen, um - zumindest so glauben sie - die radioaktive Belastung in ihrem Lebensraum zu reduzieren: Die Kinder durften nur noch in Winterkleidung im Freien spielen, Häuser wurden abgewaschen, Sand in Sandkästen ausgetauscht, der Boden auf Schulhöfen abgetragen und ähnliches Aktionistisches mehr. Der Erfolg ist nur begrenzt. Strahlenbelastung geht in Zehnerpotenz: Ein echte Reduktion, die den Namen verdient, ist eine Reduktion um den Faktor 10. Eine Reduktion um den Faktor 2 ist

Pillepalle, so als würde man auf einen Stuhl steigen und sagen, dass man jetzt weiter vom Erdmittelpunkt entfernt ist.

Die Regierung fand prima, dass die Leute so etwas glauben, bestärkte sie sofort in ihrem Glauben und legte ein großes Programm zur "vollständigen" Dekontamination der verseuchten Gebiete auf, das aber noch nicht besonders weit gediehen ist.

Nach zwei Jahr dämmert es wohl vielen Evakuierten, die noch in vorläufigen Unterkünften untergebracht sind und noch nicht irgendwo anders in Japan ein neues Leben begonnen haben, dass sie wohl nie wieder in ihre alte Heimat zurückkehren werden

und dass insbesondere für die älteren unter ihnen, diese provisorischen Unterkünfte die Endstation sein werden.

Zwar wird durch die Diskussion, ob und wann die Einwohner zurückkehren sollen oder ob neue Orte gegründet werden sollen, den Evakuierten neue Hoffnung gemacht, aber der Regierung schwebt offensichtlich die einfachste Lösung vor: sie zahlt den Evakuierten 1000 Euro pro Monat und wartet bis diese Leute gestorben sind und das Problems sich so von selber löst.

Derweil lässt es sich dieser Strauß, eines der vielen Haus- und Nutztiere, die bei der Evakuierung zurückgelassen werden mussten und deshalb von ihren Besitzern freigelassen wurden, in der Todeszone gut gehen.

Für die Tierschützer unter den Lesern: Tiere vertragen erheblich mehr Strahlung als Menschen, ohne Schaden zu nehmen.

11 Anhang 1: Voraussetzungen zum Weiterbetrieb deutscher Reaktoren

11.1 Vorbemerkung

Jede Nachrüstmaßnahme an bestehenden Kernkraftwerken hat zwei große Nachteile:

1) Erhebliche Kosten

2) Eingriff in das bestehende integrale Sicherheitskonzept

Es werden deshalb nur Forderungen erhoben, die als unabdingbar erachtet werden. Die Lösungsvorschläge sind bezahlbar und passen in das integrale Sicherheitskonzept der vorhandenen Anlagen.

11.2 Schutz gegen den Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs

Natürlich könnte man sich zurücklehnen und sagen, dass es in Deutschland keine Tsunamis gibt und dass es deshalb aus dem Unglück nichts zu lernen gibt. Aber dann macht man es sich zu einfach. In Deutschland gibt es zwar keine Tsunamis, dafür aber andere mindestens genauso gefährliche externe Bedrohungen für die Atomkraftwerke, gegen die diese nicht ausreichend geschützt sind: Der gezielte Absturz eines Verkehrsflugzeuges auf ein Atomkraftwerk.

Seit dem Terror-Anschlag auf die Zwillingstürme des World Trade Center und das Pentagon am 11. September 2001 ist es offensichtlich, dass der gezielte Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs auf ein Atomkraftwerk nicht ausgeschlossen werden kann und deshalb zu den Äußeren Einwirkungen (external hazards) gehört, gegen die das Atomkraftwerk geschützt werden muss.

Damit gehört der Lastfall "Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs (z.B. Boeing 747 oder Airbus A380 = 400 to Gewicht und 200 m/s Aufschlagsgeschwindigkeit) zu den Lastfällen, gegen die das Atomkraftwerk ausgelegt sein muss.

Da eine direkte Nachrüstung des äußeren Containments, das als Flugzeugabsturzsicherung dient und gegen ein militärisches Kampfflugzeug wie eine F4 Phantom ausreichend ausgelegt ist, nicht möglich ist, muss man andere Lösungen finden.

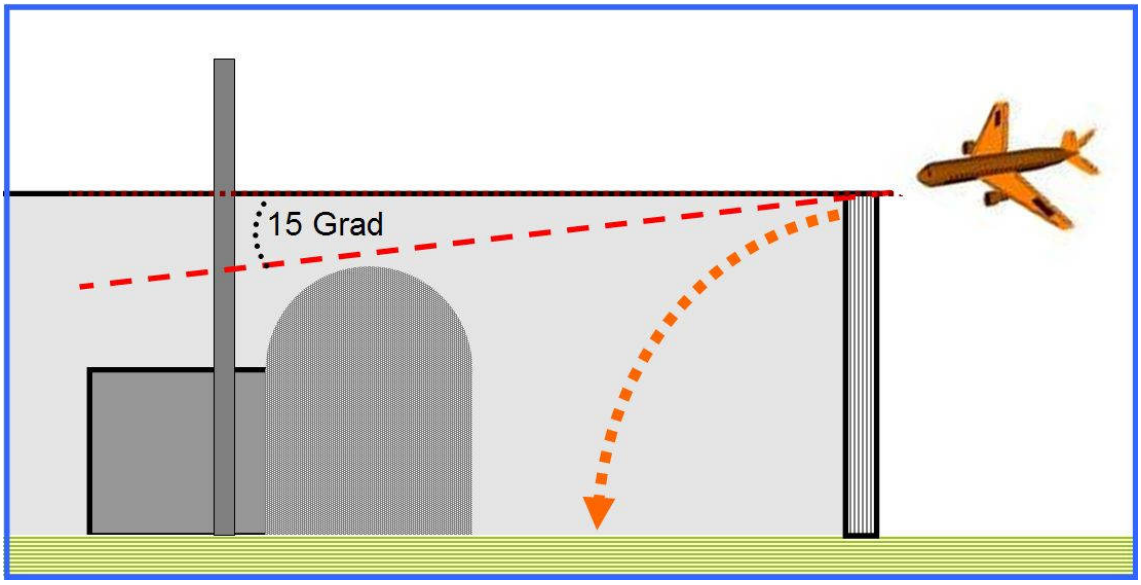
Am überzeugendsten ist der Vorschlag von Prof.Dr.Ing. Dr.Ing E.h.mult Josef Eibl, „Airplane Impact on Nuclear Power plants“ (http://www.iasmirt.org/SMiRT17/J03-6.pdf), da es sich hier um ein passives Sicherheitssystem handelt, das nicht aktiviert werden muss, wartungsfrei ist und auch noch zusätzliche Vorteile bietet.

Der Grundgedanke dieses Konzepts beruht auf der Tatsache, das große Verkehrsflugzeug nicht wie Kampfflugzeuge beliebige Manöver fliegen können sondern ein recht behäbiges Flugverhalten haben.

Dazu gehört auch, dass sie nicht beliebig steil nach unten im Sinkflug fliegen können sondern nur mit einem maximalen Sinkwinkel von 15°. Versuchen sie schneller zu sinken, erhöht sich ihre Geschwindigkeit und damit der Auftrieb, so dass sie wieder ansteigen. Die Filmaufnahmen des Einschlags in die Zwillingstürme des World Trade Centers zeigen diesen einzig möglichen fast waagerechten Anflug.

Würde man um die Kernkraftwerke in ausreichendem Abstand eine Mauer errichten, die so hoch ist, dass das Verkehrsflugzeug im Sinkflug das Atomkraftwerk nicht erreichen kann, dann wäre das der perfekte Schutz gegen den gezielten Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges.

Die technischen Anforderungen an diese Mauer sind nicht besonders groß; Hauptsache viel Gewicht und soweit vom Atomkraftwerk entfernt, dass der Einsturz der Mauer das Atomkraftwerk nicht gefährdet. Es ist kein Problem, wenn die Mauer schwer beschädigt wird, wichtig ist nur, dass das Flugzeug gestoppt wird. Beim Aufprall auf die Mauer wird das Flugzeug in kleinste Teile zerrissen und auch die großen Mengen Treibstoff gelangen nicht bis zum Atomkraftwerk.



Wenn man die Mauer aus Fertigelementen baut, sind die Kosten dieser Mauer bezahlbar: Beton ist billig und Kies und Sand als Ballast noch billiger.

Ein weiterer nicht zu unterschätzender Vorteil der Mauer ist, dass sie das Atomkraftwerk auch gegen alle Aktionen vom Boden aus schützt und die Zugänglichkeit für Unbefugte erschwert.

11.3 Notfall-System zur Druckentlastung des Primärkreises bei Schweren Störfällen zur Verhinderung des Versagens auf dem Hochdruckpfad

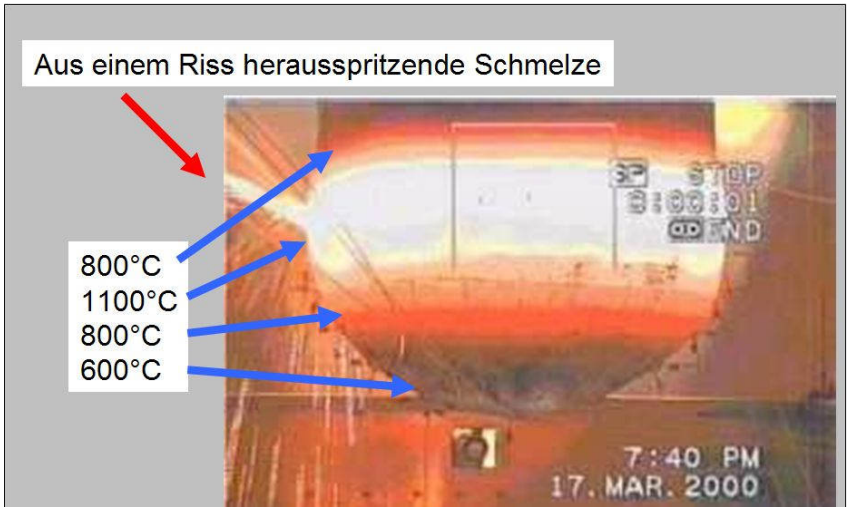
Beim Störfall in Three Mile Island 1979 hat die Bedienungsmannschaft eine Zeitlang verzweifelt versucht, den Primärdruck soweit abzusenken, dass der Ansprechdruck der Akkumulatoren erreicht wird und die Akkumulatoren Wasser in den Kern einspeisen. Das hat aber nicht funktioniert, weil das Abblaseventil auf dem Druckhalter dafür zu klein ausgelegt war. Als Konsequenz ist es jetzt Standard, dass in Druckwasser-Reaktoren drei Abblaseventile mit ausreichender Kapazität installiert sind.

Diese drei Ventile haben sowohl betriebliche Funktionen als auch Sicherheitsfunktionen, also eine Verletzung der Sicherheitsphilosophie der konsequenten Trennung dieser Funktionen mit entsprechender Reduzierung der Zuverlässigkeit.

Die zuverlässige Druckentlastung des Primärkreises hat eine überragende Bedeutung für die Bewältigung von Schweren Störfällen und die Begrenzung möglicher Folgen.

Es ist für die meisten Nuklearexperten und selbst für Experten für Schwere Störfälle schwer zu verstehen, warum die Vermeidung dieses "Versagens auf dem Hochdruck-pfad" so wichtig ist. Deshalb wird das Problem hier etwas ausführlicher diskutiert:

Wenn die Schmelze sich in die untere Kugelkalotte verlagert hat, bildet sie dort einen Schmelzesee mit einer Berandung aus festem wieder erstarrten Kernmaterial. In diesem Schmelzesee findet eine konvektive Strömung statt: Heiße Fluidanteile steigen auf und kalte Fluidanteile sinken ab. Dabei ergibt sich eine merkwürdige Wärmeverteilung, die das Bild darstellt. Es zeigt ein Experiment mit konvektiver Schmelze in einem Modell-Druckgefäß, in dem Moment, wo sich ein Riss bildet und die Schmelze herausspritzt.



An den Farben erkennt man die Temperatur der Behälterwand. Der Behälter ist nicht unten am Südpol am heißesten sondern am oberen Rand der Schmelze. Es bildet sich also ein heißer Ring um den Behälter herum am oberen Rand der Schmelze und der Behälter versagt dort, wo er am heißesten ist.

Natürlich wurde das Experiment bei niedrigem Druck im Behälter ausgeführt. Bei hohem Druck, also über 100 bar, würde die Kugelkalotte schlagartig abreißen und der Druckbehälter wie ein Rakete nach oben wegschießen mit einer solchen Wucht, dass es physikalisch nicht ausgeschlossen werden kann, dass er das Containment durchschlägt und mit dem gesamten radioaktiven Inventar davon fliegt.

Die Fotomontage zeigt dieses Horrorszenario.

Um dieses Szenario mit höchster Wahrscheinlichkeit auszuschließen, wird bei den neuen Druckwasser-Reaktoren wie dem EPR in Finnland ein zusätzliches von den übrigen Sicherheitssystem getrenntes großes Abblaseventil eingebaut, dessen einzige Funktion es ist, im Schweren Störfall den Druck im Primärkreis abzusenken und den Schweren Störfall in den sogenannten "Niederdruckpfad" zu überführen.

Es ist technisch kein Problem, die vorhandenen Reaktoren entsprechend nachzurüsten, da man dieses Ventil irgendwo im Containment installieren kann, wo man Platz hat. Da dieses Ventil nur einmal geöffnet werden muss und dann offen bleiben kann, könnte man auch ein preiswertes und extrem zuverlässiges Ventil verwenden, das durch eine Sprengladung geöffnet wird ("squib valve"), wie es im AP1000 geplant ist.

11.4 Ertüchtigung der Stromversorgung durch die Notstrom-Diesel-Generatoren

Was bedeutet die Eigenschaft „diversitär“?

Diversitär bedeutet, dass unterschiedliche technische Lösungen für dasselbe Problem verwendet werden.

Beispiel 1: Antrieb von Pumpen. Wird die Pumpe mit einem elektrischen Motor betrieben und die zweite Pumpe mit einer Dampfturbine, dann ist der Antrieb diversitär.

Beispiel 2: Ist die erste Pumpe eine Kolbenpumpe und die zweite eine Axialpumpe, dann ist der Pumpentyp diversitär.

Der gleichzeitige Ausfall der Notstromdiesel-Generatoren in Fukushima trug wesentlich zum katastrophalen Ausmaß des Störfalls bei. Hätten die Notstromdiesel bestimmungsgemäß funktioniert, hätte es der Störfall nicht einmal in die Abendnachrichten geschafft. Aber alle Notstromdiesel waren so gebaut, dass ein einziges Ereignis zum Versagen von allen Notstromdieseln führte.

Auch die Notstromdiesel in deutschen Anlagen zeichnen sich durch einen Mangel an Diversität aus, d.h. vier baugleiche Systeme befinden sich in einem einzigen Gebäude in vier Gebäudescheiben nebeneinander und sind damit anfällig für Ausfall aus gemeinsamer Ursache (CMF = Common Mode Failure). Man fragt sich immer wieder, was sich die Designer der Anlage dabei nur gedacht haben.

Dies ist aus Sicht der Reaktorsicherheit eine Schwachstelle und deshalb wurde beim EPR in Finnland Olkiluoto 3 eine bessere und zuverlässigere Lösung gewählt. Die Notstromdiesel befinden sich in zwei verschiedenen und räumlich getrennten Gebäuden links und rechts vom Reaktorgebäude und in jedem Gebäude befindet sich noch ein zusätzlicher "ultimate emergency" oder "Station-Black-Out" Dieselgenerator, der zum Einsatz kommt, wenn die vier Notstromdiesel versagen. Genaueres über diese "ultimate emergency" Notstromdiesel, Bauweise und Schaltung findet sich z.B. im HSE Sicherheitsbericht zum EPR.

Der "ultimate emergency" Notstromdiesel ist echt diversitär: also anderes Modell, andere Wartung und mit einem eigenen "day tank" mit Dieselvorrat für einen Tag ausgestattet. Die Übernahme dieses Konzeptes wäre eine Option.

Eine Alternative zur Nachrüstung mit diesen "ultimate emergency" Notstromdieseln ist die Option, zwei der vorhandenen vier Notstromdiesel durch zwei echt diversitäre Notstromdiesel zu ersetzten: also in einem neuen Gebäude auf der anderen Seite des Reaktorgebäudes, andere Bausweise des Systems, andere Notstromgeneratoren von einem anderen Hersteller, anderes Wartungs-Schema ausgeführt durch eine andere Mannschaft und eigener separater Dieseltank mit Dieselkraftstoff von einem anderen Lieferanten: also alles anders, so dass die Wahrscheinlichkeit eines Versagens aus gemeinsamer Ursache (CMF = Common Mode Failure) sehr unwahrscheinlich wird.

Aus Sicht der Reaktorsicherheit ist es ausreichend, wenn je zwei Notstromdiesel diversitär und separiert sind, sich also im Design, in den Komponenten, im Dieselkraftstoff, in der Wartung und der Leittechnik unterscheiden und in zwei auseinander liegenden Gebäuden untergebracht sind. Es müssen nicht unbedingt vier diversitäre Notstromdiesel sein.

11.5 Autarkes Notfall-System zur Kern- und Containmentkühlung bei Schweren Störfällen

Es gab einmal eine Zeit, da hielt man es nicht für erforderlich, dass ein Schiff ausreichend Rettungsboote mitführte, da man der Ansicht war, dass der unwahrscheinliche Fall eines Schiffsuntergangs so unwahrscheinlich sei, dass man dafür keine Vorsorge treffen muss.

Heute weiß man es besser.

Es gab einmal eine Zeit, da hielt man es nicht für erforderlich, dass ein Atomkraftwerk über Sicherheitssysteme für Schwere Störfälle verfügt, da man der Ansicht war, dass der unwahrscheinliche Fall eines Schweren Störfalls so unwahrscheinlich sei, dass man dafür keine Vorsorge treffen muss.

Heute weiß man es besser.

Schiffuntergang und Schwerer Störfall haben vieles gemeinsam: Wüsste man in Voraus, warum das Schiff untergehen wird, dann würde man für dieses Szenario Vorkehrungen treffen. Für alle denkbaren Szenarien hat man deshalb Vorkehrungen getroffen und falls die Sicherheitsvorkehrungen nicht reichen, dann rettet man sich mit dem Rettungsboot.

Dasselbe gilt für ein Kernkraftwerk. Wüsste man im Voraus, warum es zu einem Schweren Störfall kommt, dann würde man für dieses Szenario Vorkehrungen treffen. Für alle denkbaren Szenarien hat man deshalb Vorkehrungen getroffen und falls die Sicherheitsvorkehrungen nicht reichen, dann ist der Unterschied zum Schiffuntergang, dass man keinen Plan B hat.

Sollte man aber haben.

Plan B sollte sein, dass man das KKW mit einem "Rettungsboot" nachrüstet, also mit einem Sicherheitssystem, das völlig autark und unabhängig von den Sicherheitssystemen des KKW und ausschließlich dem Zweck dient, das Schlimmste zu verhindern, wenn alle Sicherheitssysteme versagen.

Dazu benötigt man ein autarkes und völlig eigenständiges Kern- und Containment-Kühlsystem. Für solche Systeme existieren zahlreiche Vorschläge, die Nachrüstung ist bislang an dem fehlenden Zwang von Seiten der Genehmigungsbehörde gescheitert.

Sollte es aber nicht.

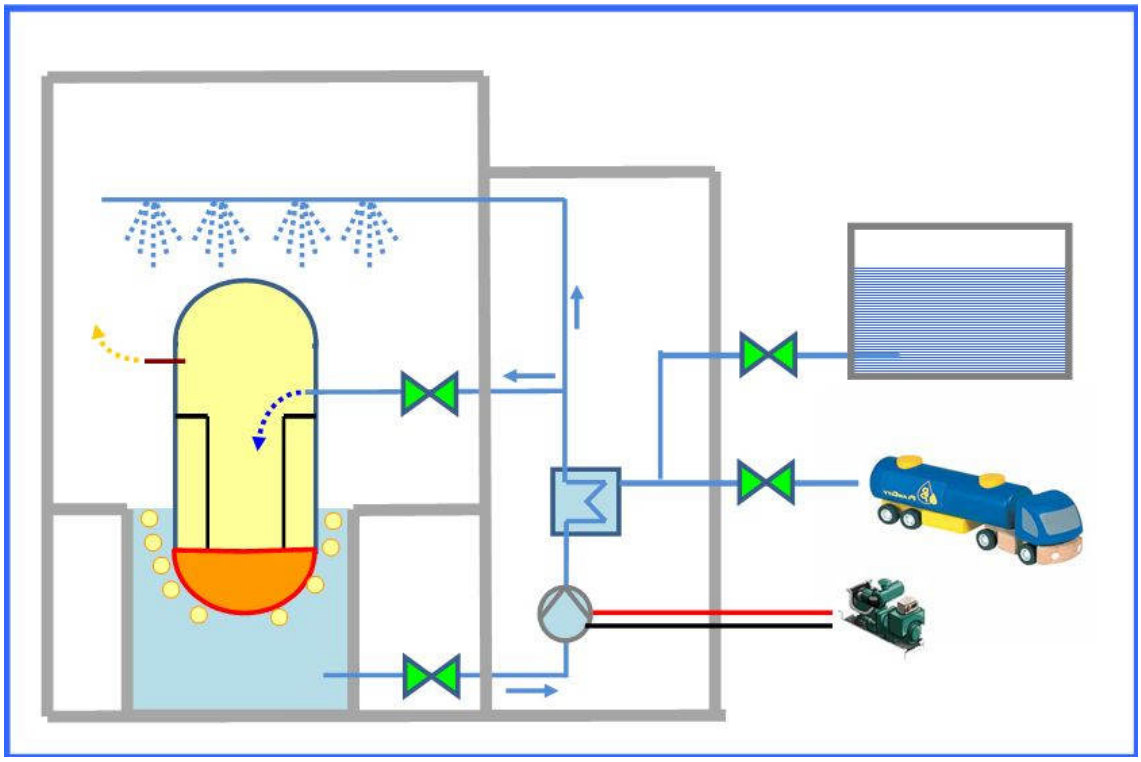
Es ist nicht möglich, alle Vorschläge hier in allen wesentlichen Details zu präsentieren, deshalb werden hier nur die Grundideen von zwei Vorschlägen vorgestellt: ein System, das auf aktiven Komponenten beruht, und ein System, das im Wesentlichen ohne externe Kräfte auskommt und Gravitation und Kondensation zum Funktionieren ausnutzt.

Im Folgenden wird nur das Grundprinzip der Kühlung erläutert, andere wichtige Aspekte werden nur angedeutet, wie z.B. dass ein Notfall-System zur Druckentlastung des

Primärkreises bei Schweren Störfällen existiert und aktiviert wurde und dass entweder ein Core-Catcher installiert ist oder die Reaktorgrube aktiv oder passiv mit Kühlwasser geflutet wird.

Das aktive System

Das Bild zeigt das Grundprinzip des aktiven Systems.



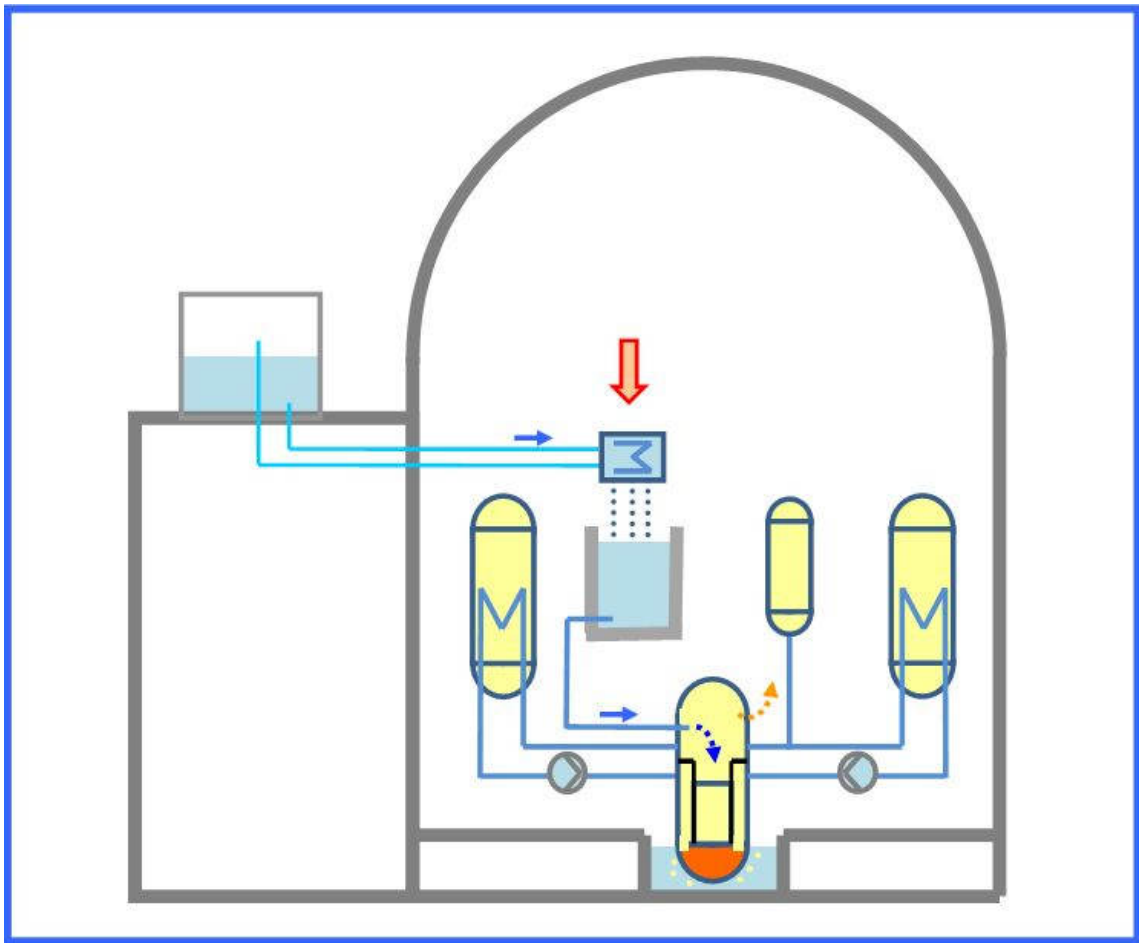
Der Grundgedanke des aktiven Systems ist es, Wasser aus der Reaktorgrube abzuziehen, zu kühlen und einen Teil des Wassers in das Reaktordruckgefäß einzuspeisen und den anderen Teil in das Containment zu sprühen. Das Containmentsprühsystem sprüht kalte Wassertropfen ins Containment und kondensiert so den Dampf in der Containment-Atmosphäre. Es regnet also regelrecht im Containment und der Niederschlag sammelt sich in der Reaktorgrube. Die erforderliche Pumpleistung kommt entweder aus der externen Stromversorgung oder aus einem mobilen Aggregat. Die Kühlung erfolgt über einen Wärmetauscher, der von außen mit Kühlwasser versorgt wird, entweder aus einem Tank oder aus einem Tankwagen. Irgendwann braucht man neues externes Kühlwasser.

Dieses System ist getrennt von allen anderen Systemen und kann relativ klein ausgeführt werden, da seine Aufgabe nicht die Verhinderung sondern nur die Begrenzung

des Ausmaßes einer Kernschmelze und insbesondere die Verteidigung des Containments als letzte Verteidigungslinie zwischen Radioaktivität und Umwelt ist.

Das passive System

Ein vergleichbares System ohne den Einsatz von elektrischer Energie im Dauerbetrieb ist komplexer. Das Bild zeigt das Grundprinzip des passiven Systems.



Außerhalb des Containments und gut zugänglich wird ein großer Vorratstank mit kaltem Wasser so installiert, da aufgrund der Höhenunterschiede das Kühlwasser zu einem Wärmetauscher innerhalb des Containments fließt. Dort wird die heiße Containmentatmosphäre aus Dampf und Luft gekühlt. Der Dampf kondensiert und regnet in eine Art Swimmingpool ab, der üblicherweise mit IRWST (In-Containment Residual Water Storage Tank) bezeichnet wird. Das Wasser aus diesem Tank fließt dann aufgrund der Schwerkraft über eine Einspeiseleitung in das Reaktordruckgefäß und kühlt den Kern.

Das weitere ist wie üblich: Der Dampf aus dem Reaktordruckgefäß wird über das Notfall-System zur Druckentlastung des Primärkreises bei Schweren Störfällen ins Containment abgeblasen und gelangt so wieder zum Wärmetauscher, wo er wieder zu Wasser wird.

Begrenzend für diesen Prozess ist der externe Wasservorrat, den man irgendwann auffüllen muss.

Auch hier gilt wieder:

Dieses System ist getrennt von allen anderen Systemen und kann relativ klein ausgeführt werden, da seine Aufgabe nicht die Verhinderung sondern nur die Begrenzung des Ausmaßes einer Kernschmelze und insbesondere die Verteidigung des Containments als letzte Verteidigungslinie zwischen Radioaktivität und Umwelt ist.

11.6 Analoge Leittechnik für die Steuerung der Anlage bei Befall mit einem Computer-Virus und bei Schweren Störfällen

Die Einführung der digitalen Leittechnik verbessert die Sicherheit der vorhandenen KKWs erheblich, deshalb ist grundsätzlich die Einführung der digitalen Leittechnik auf der Basis von TELEPERM zu begrüßen. Es bleiben jedoch in zwei Punkten grundsätzliche Bedenken:

1) Durch die Probleme mit dem STUXNET-Virus in Nuklearanlagen mit einer digitalen Leittechnik ist es offensichtlich, dass es nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Leittechnik durch Befall mit einem Computervirus ganz ausfallen kann oder nicht bestimmungsgemäß arbeitet.

Um zumindest die Grundfunktionen zu gewährleisten, ist eine zusätzliche analoge Basis-Leittechnik erforderlich, die es ermöglicht, nach Abschalten der von einem Virus befallenen digitalen Leittechnik die Anlage in einen sicheren Zustand zu überführen, also die Funktionen" Reaktor abschalten" und "Nachkühlung einschalten".

2) Die digitale Leittechnik kann nur mit Situationen umgehen, für die sie programmiert wurde. Es ist das charakteristische Merkmal eines Schweren Störfalls, dass Situationen auftreten, die so nicht vorhergesehen worden sind und für die deshalb die Leittechnik nicht entwickelt wurde. Es ist sogar nicht auszuschließen, dass ein Schwerer Störfall durch einen Common Mode Failure (CMF, Ausfall aus gemeinsamer Ursache)

der digitalen Leittechnik ausgelöst werden kann. Deshalb ist es erforderlich für Schwere Störfälle eine eigene autarke analoge auf fester Verdrahtung basierende Leittechnik in Form einer dezidierten Schwere-Störfall-Leittechnik zu installieren, die die im Schweren Störfall benötigten Basisfunktionen bereitstellt

Als Konsequenz aus dem Konzept des autarken "Rettungsboots" sollte diese spezielle Leittechnik völlig getrennt von der übrigen Leittechnik sein und auch über ein eigenes Panel auf der Notstandswarte verfügen.

11.7 Vorbereitung von externen Notfall-Maßnahmen bei Schweren Störfällen beim Betreiber

Jedes größere Werk hat seine eigene Werksfeuerwehr, obwohl man davon ausgehen kann, dass die Werksleitung alles unternimmt, um größere Brände zu vermeiden, und Brände, die nicht mit einfachen Mitteln sofort vor Ort gelöscht werden können, sehr seltene Ereignisse sind. Trotzdem werden zusätzlich zu allen Vorkehrungen zur Brandvermeidung erhebliche Mittel in das Personal und die Ausrüstung der Werksfeuerwehr investiert.

Ähnlich wie große Brände sind auch Schwere Störfälle sehr seltene Ereignisse, nur hier werden die notwendigen Mittel für ihre Bekämpfung nicht investiert.

Es muss anerkannt werden, dass die Betreiber in den letzten Jahrzehnte mehrere Maßnahmen zur Abwehr und Bekämpfung von Schweren Störfällen eingeführt haben, Stichwort: Wallmann-Ventil oder SAMGs (Severe Accident Mangement Guides), sowie auch mobiles Geräts wie Generatoren und Pumpen und die Installation von Anschlüssen für mobile Geräte an vorhandene Systeme.

Aber es fehlt ein integriertes Gesamt-Konzept, in dem eine speziell ausgebildete und trainierte „Schwere-Störfall-Gruppe“ mit eigenem Gerät vergleichbar der Werksfeuerwehr die Notfall-Maßnahmen im Schweren Störfall plant, entscheidet und durchführt.

Nur eine Gruppe von echten Spezialisten, die mit der Anlage und dem Verhalten der Anlagensysteme im Störfall vertraut ist und auch über die notwendigen Geräte und Ressourcen verfügt, kann optimal die Notfall-Maßnahmen durchführen und den Schaden wirkungsvoll begrenzen.

Da Schwere Störfälle sich dadurch auszeichnen, dass sie sich aus einem unerwarteten Störfallszenario heraus entwickeln, erfordern sie nicht nur Personal und Gerät sondern auch eine gewisse Kreativität bei dem Einsatz der vorhandenen Ressourcen, und die Bereitschaft, ungewöhnliche Entscheidungen zu treffen und Verantwortung zu übernehmen. Solche Kreativität und Entscheidungsbereitschaft ist genau das Gegenteil von den Eigenschaften, die man von der Betriebsmannschaft erwartet: Monotonie-Resistenz und pingeliges Befolgen der Vorschriften.

Das jetzige Konzept, dass die Mannschaft, deren Aufgabe der Betrieb der Anlage innerhalb der Sicherheitsbegrenzungen und die Wartung der Anlage ist, auch im Schweren Störfall zuständig ist, ist vergleichbar dem Einsatz von Ersthelfer statt Rettungssanitätern und Brandhelfern statt Berufsfeuerwehrleuten.

Die unzureichenden Notfall-Maßnahmen in Fukushima untersteichen die Bedeutung der Forderung nach Spezialisten mit geeignetem Gerät, die in einem Schweren Störfall sofort wissen, welche ersten Maßnahmen zu ergreifen sind und über die notwendigen Ressourcen verfügen.

11.8 Schaffung eines Interventionsteam für Schwere Störfälle

Für Schiffe, die durch schwierige Gewässer steuern oder besonders gefährliche Ladung führen, fordert der Gesetzgeber, dass ein Lotse an Bord ist. Da im Fall eines schweren Schiffsunglücks nicht nur dass Schiff sondern auch die Umgebung betroffen ist und in der Regel der Steuerzahler für die Schadensbeseitigung aufkommen muss, hat der Gesetzgeber diese Regelung eingeführt. Der Lotse berät aufgrund seiner hohen Sachkenntnis die Mannschaft beim Steuern durch das gefahrengeneigte Gewässer. Er ist staatlich geprüft und bei einer Körperschaft öffentlichen Rechts angestellt.

Für Kernkraftwerke, die in einen Schweren Störfall laufen, gibt es keine vergleichbare Regelung. Nur auf sich gestellt, kann der Betreiber vor sich hin wurschtelt, so geschehen in Fukushima.

Genauso wie Schiffe in schwierigen Gewässer benötigt ein Kernkraftwerk, das in einen Schweren Störfall läuft, einen "Lotsen" an Bord, der aufgrund seiner hohen Sachkenntnis und seines Überblick über das Anlagenverhalten im Schweren Störfall dem Betreiber beratend zur Seite steht.

Deshalb muss eine Körperschaft öffentlichen Rechts geschaffen, ein "Schwere-Störfall-Interventionsteam", das mit qualifizierten Sachverständigen besetzt ist. Das Interventionsteam braucht eine Zentrale mit ständigem Bereitschaftsdienst, die den Störfallablauf analysiert und Notfall-Maßnahmen empfiehlt. Gleichzeitig gibt es auch abrufbereite Kontaktpersonen für jedes Atomkraftwerk, die bei Bedarf den Informationsfluss zwischen der Warte des Kraftwerks und dem Interventionsteam herstellen.

Der Gesetzgeber und die Betreiber haben bislang nicht die Lektionen aus den Schweren Störfällen von Three Mile Island und Tchernobyl gelernt. Dank ihres - für den Betreib ausreichenden - aber im Schweren Störfall unzureichenden Wissens haben die Operateure die Störfallsituation verschärft: Die Mannschaft in Three Mile Island war zu sehr darauf fixiert, dass der Druckhalter nicht mit Wasser vollaufen durfte, und den Operateuren in Tchernobyl war es nicht klar, dass sie den Reaktor in einem Teillastbereich betrieben, in dem ein positiver Void-Koeffizient vorlag.

Der Gesetzgeber erwartet hier von der Mannschaft Dinge, die sie nicht leisten kann. Es ist Aufgabe des Gesetzgebers, die erforderliche Beratung bereitzustellen - letztlich auch um Schaden von der Bevölkerung abzuwenden. Denn es ist ja völlig klar: die Kosten eines Schweren Störfalls trägt der Steuerzahler.

Ein klares Wort zu den Sicherheitsstandards für Kernkraftwerke in Deutschland.
In Deutschland sollte der Sicherheitsstandard von Kernkraftwerken nicht niedriger sein als z.B. in Bulgarien. Dort schreibt das Regelwerk "Regulation on Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants" in § 40(2) vor: *Art. 40. (2) (amended SG No. 46/2007 and SG No. 53/2008) At least one emergency control centre shall be provided in the design, supplied with devices and systems for communication with the main and supplementary control rooms, as well as with the local municipal authorities and with the authorities of the executive power competent for emergency response – the Nuclear Regulatory Agency and the Ministry of Emergency Situations. The centre shall receive information on unit's status during the phases of accident progression and on the radiological conditions at the NPP site and its surroundings.*
Ein klares Wort zur Qualifizierung der „Experten".

Um in Deutschland Arzt, Rechtanwalt, Steuerberater oder auch nur Tagesmutter werden, muss man sich dafür durch ein Studium oder eine aufwendige Schulung qualifizieren und ein oder mehrere Prüfungen ablegen.

Solche Anforderungen gibt es bei Experten für nukleare Sicherheit nicht, weder benötigt man ein Studium noch ein Prüfung. Es genügt, wenn man bei einer einschlägigen Organisation eingestellt wird oder von den Medien für einen Experten gehalten wird.

Was dabei heraus kommt, kann man in Fukushima besichtigen.

Deutschland hat für alle gefährlichen Techniken Bundesanstalten, wie z.B. die Bundesanstalt für Luft- und Raumfahrt. aber bislang keine Bundesanstalt für Reaktorsicherheit und auch keine staatlich geregelte Ausbildung zum Nuklearexperten.

11.9 Aktive Vorbereitung auf großräumiger Evakuierung mit Plänen auch für ausreichenden Auffanglager

Ein der Lehren aus Fukushima ist, dass man sich nicht nur auf die Sicherheitssysteme zur Vermeidung von Schweren Störfällen verlassen sollte, sondern ergänzend dazu auch schadensbegrenzende Notfallmaßnahmen vorbereiten muss, also konkrete Pläne zur Evakuierung der Umgebung der Kernkraftwerke bei einem Schweren Störfall.

Dies darf nicht nur auf dem Papier durchgespielt werden, sondern es müssen auch konkret Vorbereitungen getroffen werden. Die Infrastruktur muss so organisiert werden, dass erfolgreiche Evakuierungen möglich sind, jeder betroffene Bürger ein Merkblatt mit Handlungsanweisungen für den Schweren Störfall zu Hause hat und geschult wurde, wie er sich im Ernstfall zu verhalten hat.

Natürlich muss das Ganze ordentlich organisiert werden: Einsatzleitung, Evakuierungspläne, Evakuierungshelfer und Auffanglager, zu denen sich die von der Evakuierung Betroffenen begeben und wo sie dann versorgt werden.

12 Über den Author

Reaktorsicherheit hat vor allem etwas mit gesundem Menschenverstand zu tun, deshalb sind diese Forderungen so formuliert, dass man kein "Experte" sein muss, um sie zu verstehen und zu befürworten.

Deshalb spielt die Person des Verfassers eigentlich keine Rolle.

Der Verfasser war mehrere Jahrzehnte auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit tätig, davon einige Jahre auf dem Gebiet der Schweren Störfälle.

Die letzten Jahre war er als Projektleiter für die Überprüfung des Designs des geplanten Atomkraftwerks in Belene in Bulgarien tätig. Dabei hat er sich intensiv mit allen Sicherheitsaspekten dieser geplanten Anlage beschäftigt und intensiv die Design-Lösungen mit den Design-Lösungen der Konkurrenzanlagen EPR und AP1000 verglichen.

Die acht Forderungen für die Nachrüstungen der verbleibenden deutschen Anlagen zeigen die wichtigsten Sicherheitsdefizite der deutschen Anlagen auf und präsentieren gleichzeitig bezahlbare Lösungsvorschläge.