

BERICHTE DER SNG ZUR KERNENERGIE RAPPORTS DE LA SHSN SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE

3

Beiheft zum Bulletin 1980/1 der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
und der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft
Supplément au Bulletin 1980/1 de la Société Helvétique des Sciences Naturelles
et de la Société Suisse des Sciences Humaines

Bereits erschienen:

P 300843

Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke

(Erster Bericht) von Richard Braun, Hedi Fritz-Niggli, Werner Schmid, Pierre A. Tschumi, Gerhard Wagner, Rudolf Weber

Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken

(Zweiter Bericht) von Theo Ginsburg, Dieter Imboden, André Junod, Bruno Messerli, Matthias Winiger

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

(Dritter Bericht) von Josef Halter, Otto Huber, Heinz Hugo Loosli, Hans Oeschger, Guelfo Poretti, Jean Rossel, Albert Sittkus, Werner Stumm

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

(Vierter Bericht) von Lukas Hauber, Rudolf Häusermann, Theodor Hügi, Werner Hunzinger, Heinrich Jäckli, Claude Lunke, Claude Vuilleumier

Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie

(Fünfter Bericht) von Jean Claude Courvoisier, Heini Gränicher, Gérard de Haller, Hans Rudolf Lutz, Hans Oeschger, Jean Rossel

Die Wahl des Standortes von Kernkraftwerken

(Sechster Bericht) von Franz Allemann, Herbert Lang, Dieter Mayer-Rosa, Erich Nagel, Heinz Wanner

In Bearbeitung:

Der Brennstoffzyklus für Leichtwasserreaktoren

Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung

Alternative Energien

(Zu beziehen beim Generalsekretariat der SNG, Laupenstr. 10, 3001 Bern)

BERICHTE DER SNG ZUR KERNENERGIE RAPPORTS DE LA SHSN SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

3

Einführung

Bericht

Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie

Bericht

Die Frage der Standortwahl von Kernkraftwerken

SCHWEIZERISCHE LANDESBIBLIOTHEK
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE SUISSE
BIBLIOTECA NAZIONALE SVIZZERA



Herausgegeben von der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
(Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften)

Publié par la Société Helvétique des Sciences Naturelles
(Académie Suisse des Sciences)

(Erster Bericht) von Richard Braun, Hedi Fritz, Pierre A. Tschumi, Gerhard Wagner, Rudolf Weber

Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken

(Zweiter Bericht) von Theo Ginsburg, Dieter Imboden, André Jaton, Bruno Messerli, Matthias Winiger

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

(Dritter Bericht) von Josef Halter, Otto Huber, Heinz Hugo Loosli, Hans Oeschger, Gualtero Porretti, Jean Rossel, Albert Sirkas, Werner Stüssli

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

(Vierter Bericht) von Lukas Hauber, Rudolf Häusermann, Theodor Hilt, Werner Hunzinger, Heinrich Jächli, Claude Lunke, Claude Vuilleumier

Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie

(Fünfter Bericht) von Jean Claude Courvoisier, Heini Grütter, Gábor de Haller, Hans Rudolf Lutz, Hans Oeschger, Jean Rossel

Die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie

(Sechster Bericht) von Hans-Joachim Herrmann, Albert Lang, Dieter Meyer, Erich Nageleisen, Hans Oeschger, Hans Rudolf Lutz, Hans Oeschger, Jean Rossel

In Bearbeitung:

Der Brennstoffzyklus für Leichtwasserreaktoren

Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung

Alternative Energien

Copyright © 1980 by Schweizerische Naturforschende Gesellschaft, Berne
Printed in Switzerland



SCHWEIZERISCHE LANDESBIBLIOTHEK
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE SUISSE
BIBLIOTECA NAZIONALE SVIZZERA

Wie die Kontroverse um Nutzen und Schaden von Kernkraftwerken ent- standen ist, geschieht es, dass Wissenschaftler in der Öffentlichkeit wider- spöttische Ansichten vertreten, wobei sie zugleich ihre wissenschaft- liche Arbeit ins Spiel bringen. Damit wird der Beizug um Sachbil- dung der Wissenschaftler auszuweichen sollte, kompromittiert. Angesichts der grossen Bedeutung, die dem Problem der Atomkernenergie — neben den Problemen der Luftverschmutzung — zugehört, ist es daher von elementar- bedeutender Wichtigkeit, der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft an- lässlich ihrer 100. Versammlung in Basel, vom 1. bis 3. September 1978, die Frage vorzulegen: Er ging von der Überzeugung aus, dass es möglich ist, auf wissenschaftlicher Ebene Gegner und Befürworter von Kernkraft- werken auch Meinungen, in strittigen Punkten zu einem Konsens zu bringen, Arbeitgruppen aus Fachkreisen voranzutreiben, die eine Einstellung zu Nuklearen mit dem Auftrag, zu bestimmen mit den Kernkraftwerken verbun- denen wissenschaftliche Antworten zu suchen, denen alle Beteilig- ten zustimmen könnten. Dass diese Bestrebungen in einzelnen Punk- ten scheitern könnten, ist natürlich möglich. Aber das ist nicht die Aufgabe der SNG. Die Aufgabe ist es, die verschiedenen Meinungen zu ver- ständlichen. Er dankt der SNG für ihr bereitwilliges Einverständnis.	
Zum Geleit	5
Einführung	7
5. Bericht	
Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie	9
6. Bericht	
Zur Frage der Standortwahl von Kernkraftwerken	45

Die Arbeiten, die ohne Vergüt an die Hand genommen worden, sind
noch nicht abgeschlossen. Indessen liegen seit einiger Zeit Resultate vor,
die nicht länger unveröffentlicht bleiben sollen. Der derzeitige Berner
Anschluss der SNG beschloss deshalb, die vorhandenen Berichte in Bei-
heften zum «Bulletin» der SNG und ihrer Schwesterorganisation, der
Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft, laufend zu ver-
öffentlichen. Er dankt der SNG für ihr bereitwilliges Einverständnis.

Die Verantwortung für die einzelnen Berichte tragen ausschliesslich die
sie unterzeichnenden Wissenschaftler. Die Berichte gelten nicht als
amtliche Stellungnahme der SNG; sie tritt bloss als Herausgeberin auf.

Den Wissenschaftlern, die sich an den verschiedenen Arbeitsgruppen betei-
ligten und sich weiterhin zur Verfügung stellen, gebührt für ihren Einsatz
und ihre Verständigungsbereitschaft aufrichtiger Dank. Die Schweizeri-
sche Naturforschende Gesellschaft übergibt ihre Berichte der Öffentlich-
keit in der Hoffnung, sie möchten Beachtung finden und zur Ver-
meidung der Auseinandersetzung um die Kernkraftwerke in unseren Lande
beitragen.

Prof. E. Niggli
Zentralpräsident der SNG

Seit die Kontroverse um Nutzen und Schaden von Kernkraftwerken entbrannt ist, geschieht es, dass Wissenschaftler in der Öffentlichkeit widersprüchliche Ansichten vertreten, wobei sie zugleich ihre wissenschaftliche Autorität ins Spiel bringen. Damit wird das Bestreben um Sachlichkeit, das alle Wissenschaft auszeichnen sollte, kompromittiert. Angesichts der grossen Bedeutung, die dem Problemkreis Atomkernenergie — neben anderen grossen Problemen — heute beizumessen ist, nahm der ehemalige Genfer Ausschuss der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft an dieser Lage Anstoss. Er ging von der Überzeugung aus, dass es möglich sei, auf wissenschaftlicher Ebene Gegner und Befürworter von Kernkraftwerken, wie auch Neutrale, in strittigen Punkten zu einem Konsens zusammenzuführen. Im Frühsommer 1975 fasste der Ausschuss daher den Entschluss, Arbeitsgruppen aus Fachleuten verschiedener Einstellung zu bilden mit dem Auftrag, zu bestimmten mit den Kernkraftwerken verbundenen Fragen wissenschaftliche Antworten zu suchen, denen alle Beteiligten zuzustimmen vermögen. Dass diese Bestrebungen in einzelnen Punkten zu dem Ergebnis führen könnten, es gebe vom rein wissenschaftlichen Gesichtspunkt aus zur Zeit keine gesicherte Antwort, wurde ausdrücklich in Kauf genommen.

Die Arbeiten, die ohne Verzug an die Hand genommen wurden, sind noch nicht abgeschlossen. Indessen liegen seit einiger Zeit Resultate vor, die nicht länger unveröffentlicht bleiben sollen. Der derzeitige Berner Ausschuss der SNG beschloss deshalb, die vorhandenen Berichte in Beiheften zum «Bulletin» der SNG und ihrer Schwesterorganisation, der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft, laufend zu veröffentlichen. Er dankt der SGG für ihr bereitwilliges Einverständnis.

Die Verantwortung für die einzelnen Berichte tragen ausschliesslich die sie unterzeichnenden Wissenschaftler. Die Berichte gelten nicht als offizielle Stellungnahme der SNG; sie tritt bloss als Herausgeberin auf.

Den Wissenschaftlern, die sich an den verschiedenen Arbeitsgruppen beteiligten und sich weiterhin zur Verfügung stellen, gebührt für ihren Einsatz und ihre Verständigungsbereitschaft aufrichtiger Dank. Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft übergibt ihre Berichte der Öffentlichkeit in der Hoffnung, sie möchten Beachtung finden und zur Versachlichung der Auseinandersetzung um die Kernkraftwerke in unserem Lande beitragen.

Prof. E. Niggli
Zentralpräsident der SNG

Einführung

Veranlassung

Angesichts der Kontroversen, welche *über die friedliche Nutzung der Kernenergie* entbrannt sind, ist die Öffentlichkeit ziemlich verunsichert. Zu den Stellungnahmen aus allen Richtungen gesellen sich die widersprüchlichsten Informationen; sogar die Meinungen der Wissenschaftler scheinen nicht übereinzustimmen.

Nun ist zu bemerken, dass die Uneinigkeit nicht die wissenschaftlichen Tatsachen, sondern deren Anwendung und die daraus geschlossenen Voraussagen betrifft. *Es handelt sich also eher um eine Meinungsdebatte als um eine wissenschaftliche Diskussion.*

Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft SNG ist eine unabhängige Organisation, die für die Schweiz die Stellung einer Naturwissenschaftlichen Akademie einnimmt. *Sie hat sich zum Ziel gesetzt, der nicht spezialisierten Öffentlichkeit eine sichere und objektive Information zu vermitteln*, unabhängig von jedem Interesseneinfluss und ohne jede philosophische, soziale oder politische Tendenz.

Im vorliegenden Dokument nimmt die Gruppe «Kernenergie» der SNG selber nicht Stellung. *Sie stellt nur wissenschaftliche Tatsachen vor.* Selbstverständlich spielen zahlreiche nicht die exakten und Naturwissenschaften betreffende Gesichtspunkte in die Nukleardebatte hinein. *Es ist jedoch nicht Sache der SNG*, die ökonomischen (Energiebedarf, Expansion, Rentabilität usw. betreffende) oder sozialpolitischen Aspekte zu behandeln.

Arbeitsweise und Inhalt

Die Information wurde durch Arbeitsgruppen der SNG zusammengestellt, welche den wissenschaftlichen Wert garantieren. Die Quellen dieser Information sind sowohl in den Texten wie in den Literaturverzeichnissen am Ende jedes Berichtes angeführt.

Diese befassen sich ausschliesslich mit wissenschaftlich festgestellten Tatsachen. Enthalten die konsultierten Unterlagen voneinander abweichende Informationen, so werden die Gründe der Unstimmigkeiten untersucht und nur die wirklich belegten Angaben berücksichtigt. Kann schliesslich ein Problem mit den heute verfügbaren Mitteln nicht gelöst werden, so wird die Information unter Hinweis auf ihre Unsicherheit

oder auf die in ihr enthaltenen Unzulänglichkeiten, und manchmal mit Empfehlungen für die noch notwendigen Forschungen, weitergegeben.

Obwohl die Arbeitsgruppen keine Meinung zu äussern haben, wurden sie so zusammengestellt, dass sowohl erklärte «Gegner» als auch «Befürworter» der Kernkraftwerke in ihnen vertreten sind. Die Resultate werden mit der Zustimmung *aller Mitglieder* der jeweiligen Gruppe, welche vorgängig diesem Verfahren zugestimmt haben, herausgegeben.

Die behandelten Fragen sind, im Rahmen des Möglichen, diejenigen, die sich der «Mann von der Strasse», der die Diskussionen verfolgt, stellt.

Aufbau

Die einzelnen Berichte entsprechen den verschiedenen Aspekten des Kernenergieproblems. Jedem Bericht ist eine Zusammenfassung vorangestellt. Das Wichtigste ist in Kursivschrift herausgehoben; Marginalien erleichtern das Auffinden.

Für eine rasche Orientierung wird man die Zusammenfassung benutzen. Eine vollständigere Information findet sich im Text. Der Leser, der seine Kenntnisse erweitern und vertiefen möchte, kann die Quellenangaben im Literaturverzeichnis zu Rate ziehen.

Auf diese Weise hofft die Arbeitsgruppe «Kernenergie» der SNG zur klaren und unparteilichen Information der Öffentlichkeit beizutragen.

Der Koordinator
der Arbeitsgruppe «Kernenergie»
Prof. G. de Haller

Genf, den 10. Januar 1980

Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie

Einleitung	14
Das Prinzip der Kernspaltung und der Kettenreaktion	19
Kernspaltungsreaktoren	
2.1 Das Funktionsprinzip eines Kernreaktors	21
2.2 Die Steuerung und Regelung von Kernreaktoren	23
2.3 Der Druckwasserreaktor	25
2.4 Der Siedewasserreaktor	26
2.5 Der gekühlte Hochtemperaturreaktor	28
Brutreaktoren	
3.1 Der Brutvorgang	27
3.2 Schnelle Brüter	29
3.3 Betriebserfahrungen mit Prototypen Schneller Brutreaktoren	30
Kernfusionsreaktoren	
4.1 Das Prinzip der Kernfusion	31
4.2 Funktionsprinzipien von Fusionsreaktoren	32
Abgaben eines Kernkraftwerkes an die Umgebung	33
Energiebeziehungen	
5.1 Die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie	34
5.2 Vergleich zwischen Fossilerie und Kernenergie	37
Benutzliche Probleme bei Leichtwassererkraftwerken	38
Die Lebensdauer eines Kernkraftwerkes	41
Das Kernenergieprogramm der Schweiz	
6.1 Gründe für die Wahl der in der Schweiz verwendeten Leicht-	41
wasserreaktoren	43
Der Bericht wurde erarbeitet und gutgeheissen von	

Dr. Jean Claude Courvoisier, Physiker, Genf
 Prof. Heini Gränicher, Physiker, Würenlingen
 Prof. Gérard de Haller, Biologe, Genf
 Dr. Hans Rudolf Lutz, Physiker, Bern
 Prof. Hans Oeschger, Physiker, Bern
 Prof. Jean Rossel, Physiker, Neuenburg

Inhalt

Einleitung	13
Zusammenfassung	14
1. Das Prinzip der Kernspaltung und der Kettenreaktion	19
2. Kernspaltungsreaktoren	
2.1 Das Funktionsprinzip eines Kernreaktors	21
2.2 Die Steuerung und Regelung von Kernreaktoren	23
2.3 Der Druckwasserreaktor	25
2.4 Der Siedewasserreaktor	26
2.5 Der gasgekühlte Hochtemperaturreaktor	26
3. Brutreaktoren	
3.1 Der Brutvorgang	27
3.2 Schnelle Brüter	29
3.3 Betriebserfahrungen mit Prototypen Schneller Brutreaktoren	30
4. Kernfusionsreaktoren	
4.1 Das Prinzip der Kernfusion	31
4.2 Funktionsprinzipien von Fusionsreaktoren	32
5. Abgaben eines Kernkraftwerkes an die Umgebung	33
6. Energiebeziehungen	
6.1 Die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie	34
6.2 Vergleich zwischen Fossilenergie und Kernenergie	37
7. Betriebliche Probleme bei Leichtwasserkernkraftwerken	38
8. Die Lebensdauer eines Kernkraftwerkes	41
9. Das Kernenergieprogramm der Schweiz	
9.1 Gründe für die Wahl der in der Schweiz verwendeten Leicht- wasserreaktoren	41
9.2 Kernkraftwerke in Betrieb und im Bau in der Schweiz	43
Literaturverzeichnis	44

Einleitung

Der Bericht «Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie» hat das Ziel, im Rahmen der Berichte der SNG zur Kernenergie die erforderliche gemeinsame *Basis* zu schaffen. Die Berichte, in welchen spezifische Fragen behandelt werden, können sich darauf abstützen.

In den ersten Kapiteln werden die Prinzipien der *Kernspaltung*, der *Kettenreaktion* und der *Kernspaltungsreaktoren* behandelt. Hernach werden die Charakteristiken der heute wichtigen *Kernreaktortypen* beschrieben. Weitere Kapitel sind sodann dem *Brutvorgang* und dem *schnellen Brüter* sowie der *Kernfusion* gewidmet, obschon die Nutzung der letzteren noch nicht unmittelbar bevorsteht. Eine wichtige Grundlage für die Beurteilung von thermischen Kraftwerken und von Kernkraftwerken im speziellen sind die physikalisch gegebenen Restriktionen bei der *Umwandlung von Wärme in mechanische Energie*. Es stellt sich auch die Frage, wie sich Kernenergie und Fossilenergie generell bezüglich der *Umweltbelastung* (Abwärme und Abfallprodukte) verglichen lassen. Von wesentlichem Interesse für die Kernenergie-debatte ist sodann die bisherige Erfahrung im *Betrieb von Kernkraftwerken* sowie die Frage ihrer Lebensdauer. In einem letzten Kapitel sind Angaben über das *Kernenergieprogramm* der Schweiz zusammengestellt.

Basis

Kernspaltung
Kettenreaktion
Kernspaltungs-
reaktoren
Reaktortypen
Brutvorgang
Schneller Brüter
Kernfusion

Umwandlung von
Wärme in mecha-
nische Energie
Umweltbelastung
Betrieb von
Kernkraftwerken
Kernenergie-
programm

* * *

Zusammenfassung

1. Das Prinzip der Kernspaltung und der Kettenreaktion

Kernspaltung

Kettenreaktion

Energie-
umsetzung

Spaltprodukte

Kerne des Uranisotops U-235 können Neutronen einfangen, die in ihre Nähe gelangen. Dabei werden sie im allgemeinen in zwei *Kerne gespalten* unter Emission von 2 bis 3 Neutronen, die weitere Kernspaltungen auslösen können (Kettenreaktion). Eine stationäre *Kettenreaktion* ist dann realisiert, wenn im Durchschnitt durch jede Kernreaktion eine neue ausgelöst wird.

Bei der Spaltung von 1 Gramm U-235 wird eine *Energiemenge* von ca. 23 000 Kilowattstunden bzw. ca. 1 Megawatttag in Wärme umgewandelt. Es entsteht dabei 1 Gramm *Spaltprodukte* (s. SNG-Berichte «Brennstoffe» und «Lagerung radioaktiver Abfälle»).

2. Kernspaltungsreaktoren

2.1 Das Funktionsprinzip eines Kernreaktors

Reaktor-
komponenten

In einem Kernreaktor sind spaltbarer Kernbrennstoff und nicht spaltbares Material so angeordnet, dass eine sich selbst unterhaltende Kettenreaktion ablaufen kann.

Im *Reaktorkern* befinden sich der Brennstoff, der Moderator und das Kühlmittel.

Schneller
Reaktor

In *schnellen Reaktoren* ist der Anteil an spaltbarem Material gegenüber Natururan erhöht (an U-235 angereichertes Uran oder Plutonium als Brennstoff). Die Kernspaltung erfolgt durch relativ schnelle Neutronen.

Thermische
Reaktoren

Bei *thermischen Reaktoren* werden die Neutronen durch wenige Stösse mit Kernen des Moderators auf thermische Energien gebremst, bei denen die Wahrscheinlichkeit für die Auslösung weiterer Kernspaltungen gross ist.

Leichtwasser-
reaktoren

Die heute gebräuchlichsten Leistungsreaktoren, die *Leichtwasserreaktoren*, sind mit leichtem (gewöhnlichem) Wasser moderierte (und gekühlte) thermische Reaktoren, mit an U-235 angereichertem Uran als Brennstoff.

2.2 Steuerung und Regelung von Kernreaktoren

Regelstäbe

Zur Steuerung der Kettenreaktion werden *Regelstäbe* aus stark Neutronen absorbierendem Material mehr oder weniger tief in den Reaktorkern hineingetaucht.

negativer Tempe-
raturkoeffizient

Die üblichen Kraftwerksreaktoren weisen einen *negativen Temperaturkoeffizienten* auf; die Leistung passt sich von selbst so an, dass die Temperatur gehalten wird.

Beim Leichtwasserreaktor nimmt die Leistung bei einer Verdampfung von Kühlmittel ab, beim schnellen Brutreaktor könnte dies jedoch zu einer Leistungsexkursion führen. Dieser Typ von Unfall wird im SNG-Bericht «Die Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung» behandelt.

2.3 Der Druckwasserreaktor (DWR)

Als Brennstoff dient schwach *angereichertes Uranoxid*, als Moderator *gewöhnliches Wasser*. Das Moderatorwasser steht unter einem Druck, der das Sieden verhindert, und zirkuliert durch einen Wärmetauscher, in welchem in einem zweiten Kreislauf Dampf für den Antrieb einer Turbine erzeugt wird. Leistungen von Beznau I bzw. Beznau II: Thermische Leistung 1130 MW, elektrische Bruttoleistung 364 MW (Bruttowirkungsgrad 32,2%), elektrische Nettoleistung 350 MW (Nettowirkungsgrad 31,0%).

angereichertes
Uranoxid
gewöhnliches
Wasser

Leistungen

Typische Daten moderner Druckwasserreaktoren: thermische Leistung 3000 MW, elektrische Leistung 1000 MW, Wirkungsgrad 33%.

2.4 Der Siedewasserreaktor (SWR)

Brennstoff und Moderator sind gleich wie beim Druckwasserreaktor, doch *siedet das Wasser*, und der Dampf wird aus dem Reaktorgefäß direkt der Dampfturbine zugeführt.

Wasser siedet

Die typischen *Leistungen* sind ähnlich wie beim Druckwasserreaktor, ebenso der Wirkungsgrad.

Leistungen

2.5. Der gasgekühlte Hochtemperaturreaktor (HTGR)

Als Brennstoff dient zum Beispiel auf ca. 5% *angereichertes Uran*, als Kühlmittel *Helium* und als Moderator *Graphit*. Die hohe Gastemperatur ($\geq 700^\circ \text{C}$ beim Reaktorausritt) soll Wirkungsgrade von etwa 40% ermöglichen.

angereichertes
Uran, Helium,
Graphit

3. Brutreaktoren

3.1 Der Brutvorgang

Das einzige in der Natur in abbauwürdigen Konzentrationen vorkommende, durch langsame Neutronen spaltbare Isotop ist U-235 (0,7% in natürlichem Uran). Die Hauptisotope von Uran und Thorium, U-238 und Th-232, können durch *Neutroneneinfang in spaltbares Pu-239 und U-233* überführt werden.

Neutronen-
einfang
Pu-239, U-233

Leichtwasser-reaktor	Bei <i>Leichtwasserreaktoren</i> wird aus U-238 Pu-239 erzeugt (Konversionsrate 0,6).
Hochtemperatur-reaktor	Für den gasgekühlten <i>Hochtemperaturreaktor</i> (Uran-Thorium-Variante) werden Konversionsraten von 0,9 erwartet. Auch thermisches Brüten ist möglich, jedoch mit Kostennachteil.
Schneller Brutreaktor	Beim schnellen Brutreaktor (Uran, Plutonium) hält man Brutraten bis 1,4 für möglich.

3.2 Schnelle Brüter

schnelle Neutronen	In einem Brutreaktor sollen durch Brutprozesse mehr spaltbare Kerne gebildet als verbraucht werden. Dies ist nur mit <i>schnellen Neutronen</i> (kein Moderator) möglich. Zur Kühlung sind vor allem flüssige Metalle vorgesehen.
--------------------	---

3.3 Betriebserfahrungen mit Prototypen Schneller Brutreaktoren

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über Brüterprototypen und -programme der verschiedenen Länder gegeben.

4. Kernfusionsreaktoren

4.1 Das Prinzip der Kernfusion

Kernverschmelzung	Treffen sehr leichte Kerne (Deuterium, Tritium) mit grosser Energie aufeinander, so kann sich <i>Kernverschmelzung</i> (Fusion) mit Energieumwandlung einstellen.
-------------------	---

4.2 Funktionsprinzipien von Fusionsreaktoren

Trägheits-einschluss magnetischer Einschluss	Es bestehen im Prinzip zwei Möglichkeiten, die für kontrollierte Fusion erforderlichen Bedingungen zu realisieren: der <i>Trägheitseinschluss</i> und der <i>magnetische Einschluss</i> .
--	---

Bis heute ist es noch nicht gelungen, durch kontrollierte Fusion mehr Energie zu erzeugen als zu verbrauchen.

Nachteile	Wie bei der Kernspaltung müssen auch bei der Kernfusion Nachteile in Kauf genommen werden: Abwärme, Bildung radioaktiver Nebenprodukte (keine Spaltung), grosse Mengen radioaktiven Tritiums.
-----------	---

5. Abgaben eines Kernkraftwerkes an die Umgebung

gasförmige Spaltprodukte	<i>Gasförmige radioaktive Spaltprodukte</i> können aus den Brennstoffelementen durch Undichtigkeiten entweichen; sie werden durch die Abgasanlage
--------------------------	---

über Abklingstrecken an die Umgebung abgegeben. Weiter erfolgen Emissionen über das *Abwasser*. (s. SNG-Bericht «Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken bei Normalbetrieb».)

Kernkraftwerke sind thermische Kraftwerke, in denen rund $\frac{2}{3}$ der im Reaktor erzeugten Wärme als *Abwärme* an die Umgebung abgegeben werden. Die Kraftwerke Mühleberg und Beznau geben ihre Abwärme an die Aare ab; für weitere Kernkraftwerke sind Naturzug-Nasskühltürme vorgesehen (s. SNG-Bericht «Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken»).

6. Energiebeziehungen

Vergleich
Fossilenergie
Kernenergie

6.1 Die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie

Die Energieumsetzung bei Wasserkraftwerken und thermischen Kraftwerken wird verglichen und die Wirkungsgrade von thermischen Kraftwerken und Wärmepumpen diskutiert.

<i>Wirkungsgrade:</i> Fossil beheizte Kraftwerke heute	40%	Wirkungsgrade
Kraftwerke mit Leichtwasserreaktoren	33%	
Bei Kernkraftwerken mit Hochtemperaturreaktoren und Kraftwerken mit schnellen Brüttern werden	40%	
als realisierbar betrachtet.		

6.2 Vergleich Fossilenergie und Kernenergie

Der *Heizwert* ist für die Kernspaltung zwei bis drei Millionen mal höher als für die Verbrennung von Kohle und Öl. Dementsprechend entstehen bei der Kernspaltung pro umgesetzte Energie mengenmässig viel weniger *Abfälle* als bei der Nutzung der fossilen Brennstoffe. Wegen ihrer Radiotoxizität müssen jedoch die radioaktiven Abfälle ausserhalb der Biosphäre gelagert werden (s. SNG-Bericht «Lagerung radioaktiver Abfälle»).

7. Betriebliche Probleme bei Leichtwasserkraftwerken

Auf der ganzen Welt standen Mitte 1978 64 Druckwasserreaktoren (kumulierte Verfügbarkeit 65%) und 44 Siedewasserreaktoren (kumulierte Verfügbarkeit 58%) in Betrieb. Die Verfügbarkeit der drei Schweizer Leichtwasserreaktoren liegt wesentlich höher.

Anfänglich traten *Kinderkrankheiten* auf, die heute weitgehend behoben sind. Bei älteren Anlagen entstehen Probleme im Zusammenhang mit steigender Strahlung einzelner Komponenten sowie Korrosions- und

Erosionsschäden. Weiter wird auf Probleme im Personalsektor hingewiesen.

8. Lebensdauer eines Kernkraftwerkes

Druckgefäß

Entscheidend ist die *Lebensdauer des Druckgefäßes*, für welche die Versprödung infolge Bestrahlung mit schnellen Neutronen und die limitierte Anzahl der thermischen Zyklen massgebend ist.

Noch lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen formulieren, ob die Auslegungsspezifikation von 40 Jahren zu hoch oder zu niedrig angesetzt worden ist.

9. Kernenergieprogramm der Schweiz

9.1 Gründe für die Wahl der in der Schweiz verwendeten Leichtwasserreaktoren

Betriebserfahrung

Neben den Kriterien der Wirtschaftlichkeit, der Sicherheit und der technischen Reife spielt vor allem die *Betriebserfahrung* eine entscheidende Rolle. Leichtwasserreaktoren weisen diesbezüglich einen derartigen Vorsprung auf, dass zur Zeit für die Schweiz kein anderer Typ zur Diskussion steht.

9.2 Kernkraftwerke in Betrieb oder im Bau

Elektrizitätsanteil

Der *Anteil der Elektrizität* am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz bewegte sich in den letzten Jahren um 17%, der Anteil der Kernenergie an der elektrischen Energie 1975/76 um 22,9% und 1976/77 um 22,4%. In Tabellen finden sich weitere Angaben über sich in der Schweiz in Betrieb oder im Bau befindliche Kernkraftwerke.

* * *

1. Das Prinzip der Kernspaltung und der Kettenreaktion

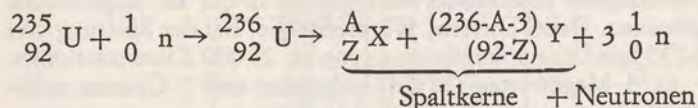
Die Atomkerne der schweren Elemente Uran und Thorium sind in einem metastabilen Zustand. Werden sie in zwei ungefähr gleich schwere Kerne gespalten, wird Energie frei. Damit eine solche Spaltung erfolgt, muss eine energetische Barriere überwunden werden. Spontane Spaltung kommt zwar vor, doch ist ihre Wahrscheinlichkeit sehr gering. Kernspaltung lässt sich jedoch künstlich auslösen. So können die *Kerne des Uranisotops U-235 Neutronen*, die in ihre Nähe gelangen, *fangen*. Dabei entsteht U-236. Die angeregten Kerne dieses Isotops besitzen eine geringe Stabilität; ein Teil davon (84%) spaltet sich daher sofort in stabilere Teile auf. Der Rest geht unter Emission von γ -Strahlen in den Grundzustand über.

Neutronen-
einfang
durch U-235

Bei der Spaltung entstehen im allgemeinen *zwei Kerne und zwei bis drei Neutronen hoher Energie*. Die Summe der Protonen der beiden Spaltkerne beträgt 92 (Protonenzahl des Urans); die Summe der Neutronen, unter Einschluss der einzeln freigesetzten Neutronen, beträgt 114 (Neutronenzahl von U-236). Bei der Reaktion wird Energie freigesetzt, und zwar zur Hauptsache als kinetische Energie (Bewegungsenergie) der beiden Spaltkerne.

Kernspaltung

Der Prozess der Kernspaltung lässt sich durch folgende Gleichung darstellen:



Symbol ${}_Z^AX$: X = Symbol des Elements; A = Anzahl der Nukleonen (Neutronen und Protonen); Z = Anzahl der Protonen (Ordnungszahl)

Die Zahl der freigesetzten Neutronen ist nicht immer dieselbe; ebenso variiert die Protonen- und Neutronenzahl der Spaltkerne X und Y.

In Fig. 1 ist der Vorgang der Kernspaltung von ${}_{92}^{236}\text{U}$ schematisch dargestellt für

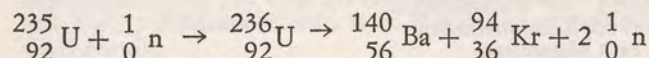
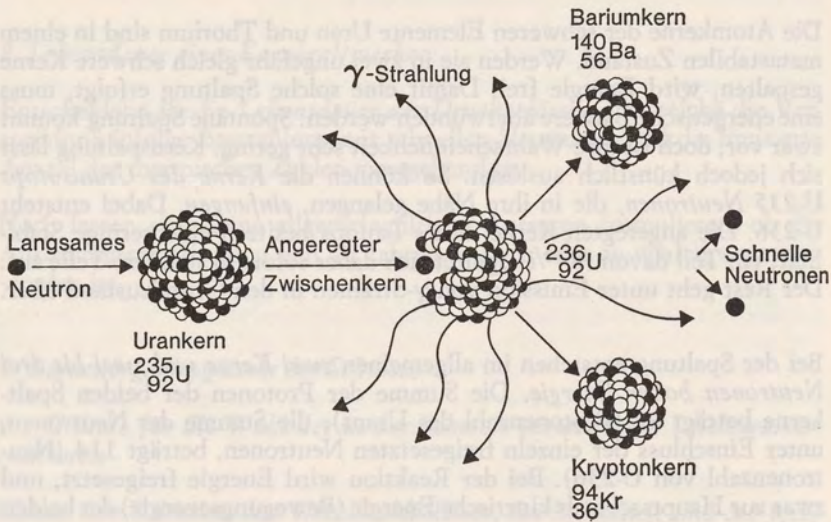


Fig. 1: Schematische Darstellung der Kernspaltung von $^{235}_{92}\text{U}$



Energie-
freisetzung

Die pro Spaltung freiwerdende Energie beträgt ca. 195 Megaelektronvolt (MeV). Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, erhalten die Spaltprodukte den Hauptanteil der Energie in Form von kinetischer Energie. Sie fliegen mit hoher Geschwindigkeit auseinander und werden in der sie umgebenden Materie abgebremst. Dabei entsteht Wärmeenergie. Bei der Spaltung von 1 Gramm U-235 wird eine Energiemenge von ca. 23 000 Kilowattstunden (kWh) bzw. ca. 1 Megawatttag (MWd) umgesetzt und 1 Gramm radioaktive Spaltstoffe erzeugt.

Tabelle 1: Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Art der Energie	MeV
1 Kinetische Energie der Spaltprodukte	162
2 Energie der 2 bis 3 Spaltneutronen	6
3 Energie der prompten γ-Strahlung	6
4 β-Zerfallsenergie	5
5 γ-Zerfallsenergie	5
6 Neutrinoenergie	11
Summe	195

1 MeV = 1 Megaelektronvolt = $1,602 \cdot 10^{-13}$ Wattsekunden

1 Wattsekunde (Ws) wird frei bei $3,1 \cdot 10^{10}$ Spaltungen

1 Gramm U-235 gibt $8,3 \cdot 10^{10}$ Wattsekunden

= 23 000 Kilowattstunden

= ca. 1 Megawatttag

Damit eine Kernspaltung ausgelöst wird, muss der spaltbare Kern, wie oben erwähnt, z. B. durch Einfang eines Neutrons, angeregt werden. Da beim Kernspaltungsprozess selbst wieder Neutronen entstehen, ergibt sich die Möglichkeit einer *Kettenreaktion*: Eine Reaktion schafft die Voraussetzung zum Ablauf der nächsten. Eine stationäre Kettenreaktion tritt dann auf, wenn im Durchschnitt durch jede Kernspaltung eine neue ausgelöst wird.

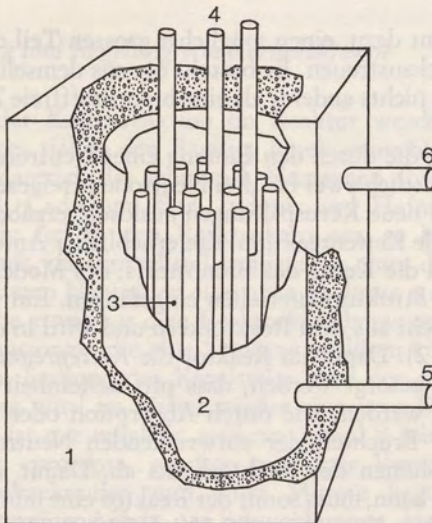
Kettenreaktion

2. Kernspaltungsreaktoren

2.1 Das Funktionsprinzip eines Kernreaktors

Kernreaktoren sind Anlagen zur Gewinnung und Umwandlung von Energie aus Kernspaltung. Im Reaktorbrennstoff läuft die Kettenreaktion der Kernspaltung ab. Durch Abbremsen der Spaltkerne wird Wärme produziert, die durch ein Kühlmittel einer Wärmekraftmaschine zugeführt wird.

Fig. 2: Das Prinzip eines Kernreaktors



1 Abschirmung (Strahlenschutz mit Beton); 2 Druckgefäß mit Moderator; 3 Brennstoffelemente (Uran 235, Uran 233 oder Plutonium 239); 4 Regelstäbe (aus Cadmium oder Bor); 5 Kühlmittel-Eintritt (z. B. Wasser, Gas oder flüssiges Metall); 6 Kühlmittel-Austritt.

In einem Kernreaktor (vgl. Fig. 2) sind spaltbarer Kernbrennstoff (z. B. U-235) und nicht spaltbares Material bezüglich Menge und räumliche Verteilung so angeordnet, dass eine sich selbst unterhaltende Kettenreaktion ablaufen kann.

Aufbau Kernreaktor

Der Reaktorkern besteht aus den Brennstoffelementen, einem Moderator zur Abbremsung der Neutronen und dem Kühlmittel (in gewissen Fällen mit Moderatorfunktion). In den Reaktorkern hinein tauchen die Regelstäbe aus einem Material mit starker Neutronenabsorption. Er ist in einem Druckgefäß untergebracht und oft von einem Reflektor zur Rückstreuung der Neutronen umkleidet. Ein Betonmantel umgibt das Reaktordruckgefäß und schirmt die Strahlung aus dem Reaktorkern ab.

Brennstoff

Als *Brennstoff* können spaltbares U-235, *spaltbares Plutonium oder Uran-233* bzw. Kombinationen dieser Spaltstoffe mit den Brutstoffen Uran-238 oder Thorium-232 verwendet werden. Im Brutstoff wird bei Einfang eines Neutrons ein neuer spaltbarer Kern erzeugt. (s. Abschnitt 3.1). Im Moderator werden die Neutronen durch Stösse mit den Kernen des Moderatormaterials abgebremst. Diese müssen möglichst leicht sein und zudem die Eigenschaft besitzen, möglichst wenig Neutronen einzufangen. Geeignete Materialien sind Graphit, gewöhnliches (leichtes) Wasser (H_2O), schweres Wasser (D_2O), Beryllium und organische Flüssigkeiten.

Moderator

Reflektor

Der *Reflektor* dient dazu, einen möglichst grossen Teil der Neutronen in den Reaktor zurückzustreuen. Er besteht oft aus demselben Stoff wie der Moderator und ist nichts anderes als eine brennstofffreie Zone.

Kettenreaktion Neutronenbilanz

Pro Kernspaltung, die durch den Einfang eines Neutrons ausgelöst wird, werden durchschnittlich zwei bis drei Neutronen freigesetzt. Würden alle Neutronen wieder neue Kernspaltungen auslösen, ergäbe sich eine ausser Kontrolle geratende Kettenreaktion. Ein erheblicher Anteil der Neutronen wird jedoch durch die Kerne des Brennstoffs, des Moderators, des Kühlmaterials und der Strukturmaterialien eingefangen. Ein weiterer Teil der Neutronen entweicht aus dem Reaktorkern und wird in der Abschirmung eingefangen (Fig. 2). Damit im Reaktor die *Kettenreaktion* stationär abläuft, muss dafür gesorgt werden, dass pro Zeiteinheit gleich viel Neutronen freigesetzt werden, wie durch Absorption oder Entweichen verloren gehen. Der Bruchteil der entweichenden Neutronen nimmt mit zunehmendem Volumen des Reaktorkerns ab. Damit sich eine Kettenreaktion abspielen kann, muss somit der Reaktor eine minimale «kritische» Grösse besitzen. Mit *Natururan* (99,3% U-238, 0,7% U-235) oder mit auf wenige Prozent U-235 angereichertem Uran allein lässt sich *ohne Moderator*, selbst bei einem sehr gross dimensionierten Reaktor, *keine Kettenreaktion* erreichen, da die Neutronen weitgehend durch das U-238 eingefangen werden.

Natururan

Diese Schwierigkeit kann grundsätzlich auf zwei Arten überwunden werden:

Entweder durch Erhöhung des Anteils an spaltbarem Material, z. B. durch Verwendung von an U-235 angereichertem Uran oder von Plutonium als Brennstoff; dieser Weg führt zum *schnellen Reaktor*, bei welchem die schnellen Neutronen bei relativ hohen Energien an der Kettenreaktion teilnehmen;

schneller Reaktor

oder durch Abbremsung im Moderator der bei Kernspaltungen freigesetzten Neutronen in relativ wenigen Stößen auf Energien unter 1 Elektronvolt (langsame Neutronen) mittels eines Moderators. Der Energiebereich, in welchem die Einfangwahrscheinlichkeit durch U-238 gross ist, wird somit rasch überbrückt. Für die langsamer werdenden Neutronen nimmt die Einfangwahrscheinlichkeit durch U-235 zu. Reaktoren, die nach diesem Prinzip arbeiten, werden als *thermische Reaktoren* bezeichnet. Natururan eignet sich als Reaktorbrennstoff, falls schweres Wasser als Moderator verwendet wird.

thermischer Reaktor

Die heute gebräuchlichsten Leistungsreaktoren (auch diejenigen in Beznau und Mühleberg) werden mit gewöhnlichem Wasser moderiert (Leichtwasserreaktoren); als Brennstoff dient leicht angereichertes Uran.

Leichtwasserreaktoren

2.2 Die Steuerung und Regelung von Kernreaktoren

Zur *Steuerung* der Kettenreaktion im Reaktor werden die *Regelstäbe* mehr oder weniger tief in den Reaktor hineingetaucht. Sie bestehen aus oder enthalten Material, das sehr stark Neutronen absorbiert. Geeignete Materialien sind: Cadmium, Bor, Indium und Hafnium. Tauchen die Regelstäbe relativ tief in den Reaktorkern ein, so ist die Neutronenabsorption so stark, dass im Mittel weniger als eines der bei einer Kernspaltung freigesetzten Neutronen eine neue Spaltung auslösen kann. Werden die Regelstäbe etwas aus dem Reaktorkern herausgezogen, nimmt der Bruchteil der Neutronen, die eine Spaltung auslösen können, zu, und bei einer bestimmten Stellung der Regelstäbe wird der Reaktor *«kritisch»*, d. h. pro Spaltung wird im Mittel wieder eine neue Spaltung ausgelöst. Diese Steuerung ist nur möglich, weil ein Anteil β (einige Promille) der Neutronen nicht *«prompt»*, sondern mit einer Verzögerung, die etwa zwischen Zehntelssekunden und einer Minute liegt, emittiert wird. Dadurch bleibt genügend Zeit, um Schwankungen des Neutronenflusses durch Ein- und Ausfahren der Regelstäbe zu korrigieren.

Steuerung Regelstäbe

Reaktor kritisch

Die Multiplikation k gibt das Verhältnis der Neutronenzahlen in zwei aufeinanderfolgenden Generationen der Kettenreaktion an:

$$k = \frac{\text{Neutronenzahl einer Generation}}{\text{Neutronenzahl der vorhergehenden Generation}}$$

Reaktivität Man definiert nun die Reaktivität $\rho = \frac{k-1}{k}$ als Mass der Abweichung vom kritischen Zustand. Ist der Reaktor kritisch, so ist $k = 1$ und $\rho = 0$. Für Leistungszunahme gilt $\rho > 0$ und für Leistungsabnahme $\rho < 0$.

Verzögerte Neutronen Für die Zeitkonstante der Leistungsänderung ist neben der Reaktivität ρ die Generationsdauer wesentlich und für diese wiederum das Verhalten der *verzögerten Neutronen*. Deren Anteil β beträgt zwar nur *einige Promille*, die mittlere *Verzögerungszeit* jedoch zwischen 13 und 20 Sekunden, verglichen mit der Zykluszeit von 10^{-4} bis 10^{-3} Sekunden der in der Spaltung direkt entstehenden prompten Neutronen.

Reaktor prompt überkritisch Ist nun $0 < \rho < \beta$, so spielt die Verzögerungszeit der verzögerten Neutronen eine wesentliche Rolle; der Reaktor ist gut regulierbar. Ist $\rho > \beta$, dann ist der Reaktor *«prompt überkritisch»*; die prompten Neutronen bewirken allein schon eine Leistungszunahme mit ihrer kurzen Zykluszeit entsprechend der positiven prompten Reaktivität $\rho - \beta$.

Kraftwerksreaktoren sind so ausgelegt, dass dieser Zustand nicht auftreten kann. Er wird aber in eigens dafür gebauten Forschungsreaktoren routinemässig herbeigeführt. Für Kraftwerksreaktoren wurden prompt-überkritische Zustände versuchsmässig herbeigeführt, um die dadurch verursachten Schäden an Brennelementen zu untersuchen.

$\rho - \beta$ entspricht grössenordnungsmässig dem Reaktivitätswert zwischen dem voll ausgefahrenen und dem voll eingefahrenen Zustand eines Regelstabes.

negativer Temperaturkoeffizient Die üblichen Kraftwerksreaktoren weisen einen *negativen «Temperaturkoeffizienten»* auf, d. h. eine Abnahme der Reaktivität bei einem Temperaturanstieg. Dies bewirkt eine *Stabilisierung* in dem Sinne, dass bei festgehaltenem Regelmechanismus die Leistung dann sinkt, wenn weniger Leistung abgeführt wird und umgekehrt. Grob gesagt: Die Regelabstellung bestimmt nur die Temperatur; die Leistung passt sich von selbst so an, dass diese Temperatur gehalten wird.

Voidkoeffizient Tritt bei einem Leichtwasserreaktor eine Verdünnung des Kühlmittels auf (z. B. Dampfblasen bei einem PWR), setzt die Kettenreaktion wegen des negativen *Voidkoeffizienten* von selbst aus. Bei einem schnellen Brutreaktor ist aber oft der Voidkoeffizient positiv, so dass bei einem Verdampfen von Natrium (z. B. infolge augenblicklicher völliger Unterbrechung der Kühlströmung und Versagen der Regelstäbe) eine prompt überkritische Reaktivitätsexkursion auftreten könnte. Diese würde durch den

negativen Temperaturkoeffizienten reduziert, aber nicht genügend rasch, um einen explosionsartigen Bruch des Reaktorkerns zu unterbinden. Der Reaktorbehälter wird zur Aufnahme des aus dieser Exkursion zu erwartenden Druckes dimensioniert. Dieser hypothetische Unfall wird im SNG-Bericht «Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung» besprochen, eingebettet in Risikoüberlegungen, die es erst gestatten, seinen effektiven Stellenwert zu beurteilen.

2.3 Der Druckwasserreaktor (PWR)

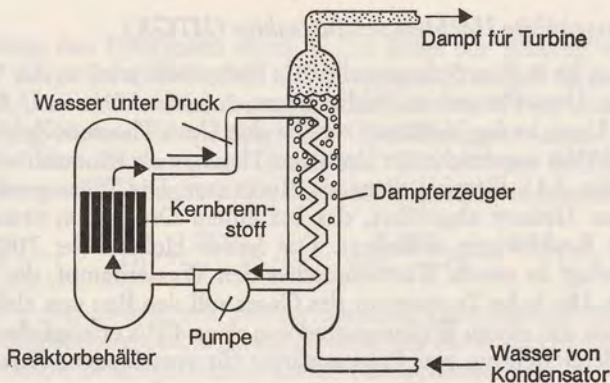
Beispiel: Kernkraftwerk Beznau I und II

Der Druckwasserreaktor (Fig. 3) ist aus dem Reaktor des ersten nuklear betriebenen Unterseebootes USS Nautilus weiterentwickelt worden. Bei diesem Reaktortyp wird leicht angereichertes Uranoxid als Brennstoff verwendet. Reines Wasser wird sowohl als Moderator wie auch als Kühlmittel benutzt. Das Wasser fließt bei einer Temperatur von etwas über 300° C durch den Reaktorkern und wird in einen Wärmetauscher geleitet, in welchem Dampf für den Antrieb einer Turbine (mit Generator) erzeugt wird. Das Wasser steht unter einem Druck von etwa 150 bar, der das Sieden verhindert. Die *beiden Flüssigkeitskreisläufe sind getrennt*, so dass sich das Kühlwasser des Reaktors mit dem Wasser, das zur Erzeugung des in der Turbine verarbeiteten Dampfes dient, nicht vermischen kann. Die Reaktoren der Kraftwerke Beznau I und II besitzen je eine thermische Leistung von 1130 MW; die elektrische Nettoleistung beträgt 350 MW. Die typischen Leistungen von modernen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren sind 3000 MW thermische Leistung und 1000 MW elektrische Leistung, entsprechend einem Wirkungsgrad von 33%.

leicht angereichertes Uranoxid

zwei getrennte Flüssigkeitskreise

Fig. 3: Das Prinzip eines Druckwasserreaktors

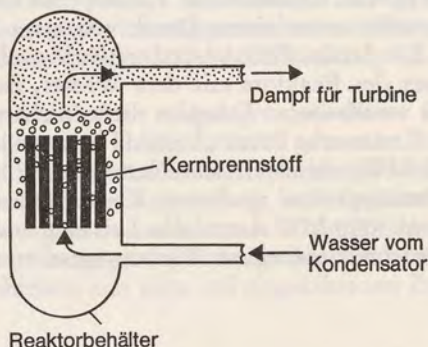


2.4 Der Siedewasserreaktor (BWR)

Beispiel: Kernkraftwerk Mühleberg

Als Brennstoff wird wie beim Druckwasserreaktor *leicht angereichertes Uran* verwendet. Im Siedewasserreaktor (Fig. 4) fließt reines Wasser durch die Anordnung der Brennelemente. Die in den Brennelementen erzeugte Wärme bringt das Wasser im Reaktorkern selbst zum Sieden. Der Dampf wird aus dem Reaktorgefäß direkt einer Dampfturbine zugeführt, die einen elektrischen Generator antreibt. Der Druck im Reaktor beträgt etwa 70 bar; der Dampf hat eine Temperatur von 285°C. Im Gegensatz zum Druckwasserreaktor besitzt also der Siedewasserreaktor nur *einen Flüssigkeitskreis*, und er besteht aus weniger Hauptkomponenten; die Dampfturbine kommt jedoch in Berührung mit schwach radioaktivem Material. Die typischen Leistungen sind ähnlich wie beim Druckwasserreaktor, ebenso der Wirkungsgrad.

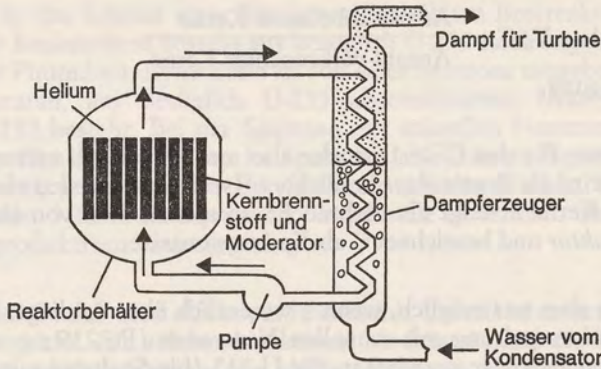
Fig. 4: Das Prinzip eines Siedewasserreaktors



2.5 Der gasgekühlte Hochtemperaturreaktor (HTGR)

Das Schema ist in Fig. 5 dargestellt. Als Brennstoff wird in der Variante, welche den Uran-Plutonium-Zyklus nutzt, auf etwa 5% an U-235 angereichertes Uran, in der Variante, welche den Uran-Thorium-Zyklus nutzt, hoch (bis 93%) angereichertes Uran und Thorium als Brutstoff verwendet (s. Abschnitt 3.1). Graphit dient als Moderator. Die Wärme wird durch das Edelgas *Helium* abgeführt, das bei einem Druck von etwa 40 bar durch den Reaktorkern zirkuliert. Das heiße Helium ($\sim 700^\circ\text{C}$ und höher) erzeugt in einem Wärmetauscher den Wasserdampf, der die Turbine treibt. Die hohe Temperatur des Gases soll den Bau von elektrischen Kraftwerken mit einem Wirkungsgrad von etwa 40% ermöglichen, jedoch auch die Bereitstellung von Prozesswärme für verschiedene Zwecke.

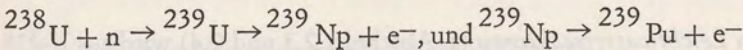
Fig. 5: Das Prinzip eines gasgekühlten Hochtemperaturreaktors



3. Brutreaktoren

3.1 Der Brutvorgang

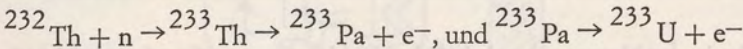
Das einzige in der Natur vorkommende, durch langsame Neutronen spaltbare Uran-Isotop ist U-235, welches zu nur 0,7% im natürlichen Uran vorhanden ist. Das Nuklid U-238 (Häufigkeit in Uran: 99,3%) lässt sich nur durch Neutronen mit Energien über 1 MeV (sogenannte schnelle Neutronen) spalten und trägt daher beim thermischen Reaktor nicht wesentlich zur Kettenreaktion bei. Es wird jedoch durch die folgende Reaktion in spaltbares Pu-239 umgewandelt:



Brüten von
Pu-239

(e^- ist das Symbol für Elektron resp. Beta-Teilchen.)

Der Einfang von Neutronen durch U-238 führt zur Bildung von U-239, das sich rasch durch β -Zerfall in Neptunium-239 und dann in Plutonium-239 umwandelt. Das Isotop Pu-239 ist wie U-235 durch niederenergetische Neutronen spaltbar. Die Überführung in einen spaltbaren Kern wird als «Brutvorgang» bezeichnet. Ein anderes Beispiel ist die Umwandlung von Thorium-232 via Protactinium-233 in Uran-233.



Brüten von
U-233

Von den η Neutronen, die pro im Spaltstoff absorbiertes Neutron im Mittel freigesetzt werden, wird ein Neutron für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benötigt. Ferner treten Neutronenverluste V infolge Ab-

sorption in Kühlmittel und Strukturmaterial sowie durch Leckage auf. Für das Brüten steht somit der Neutronenanteil

Neutronenanteil
für Brüten

$$C = \eta - 1 - V; C = \frac{\text{Anzahl erbrüteter Kerne}}{\text{Anzahl verbrauchter Kerne}}$$

zur Verfügung.

Ein Reaktor, für den $C > 1$ ist, der also mehr Spaltstoff erzeugt als verbraucht, wird als *Brutreaktor* bezeichnet. Ist $C < 1$, werden also weniger spaltbare Kerne erzeugt als verbraucht, so spricht man von einem *Konverter-Reaktor* und bezeichnet C als Konversionsrate.

Brutreaktor

Konverterreaktor

$C > 1$ ist aber nur möglich, wenn η wesentlich über 2,0 liegt. Dies trifft für Plutoniumspaltung mit schnellen Neutronen (Pu-239 : $\eta = 2,6$ bis 2,9) zu und, weniger ausgeprägt, für U-233 (für Spaltung mit schnellen und thermischen Neutronen $\eta \sim 2,3$). Alle andern spaltbaren Kerne weisen η -Werte auf, die unter 2,1 liegen. Darum ist ein Reaktor mit schnellen Neutronen und Plutonium als Spaltstoff am besten für Brüten geeignet (schneller Brüter).

schneller Brüter

Beim den Uran-Plutonium-Zyklus nutzenden *schnellen Brutreaktor* (s. Abschnitt 3.2) wird im die eigentliche «Spaltzone» umgebenden Brutmantel U-238 in Plutonium — zunächst Pu-239 — später auch in schwerere Pu-Isotope umgewandelt. Man hält *Brutraten* bis zu 1,4 und Verdopplungszeiten von 10 Jahren für möglich. Für den französischen Schnellbrüter *Superphenix* erwartet man mit der heutigen Auslegung Brutraten von 1,18 bis 1,20, und die (noch nicht optimalen) *Verdopplungszeiten* werden auf 20 bis 30 Jahre geschätzt.

Verdopplungs-
zeiten

Leichtwasser-
reaktoren

Bei den *Leichtwasserreaktoren* (s. Abschnitt 2.3 und 2.4) wird aus U-238 spaltbares Pu-239 erzeugt; die Konversionsrate beträgt $C \approx 0,6$.

Hochtemperatur-
reaktor

Bei der den Uran-Thorium-Zyklus nutzenden Variante des *gasgekühlten Hochtemperaturreaktors* (s. Abschnitt 2.5) wird als Brennstoff ca. 10% auf 93% angereichertes U-235 als Spaltstoff und ca. 90% Th-232 als Brutstoff verwendet. Anfänglich erfolgt nur Spaltung des U-235. Durch Neutroneneinfang wird jedoch laufend Th-232 in spaltbares U-233 umgewandelt, das einen wachsenden Anteil zur Energieumsetzung beisteuert. Es wird erwartet, dass Konversionsraten von 0,9 realisiert werden können.

U-238 ist in der Natur mehr als hundertmal häufiger vorhanden als U-235, und die Thoriumvorkommen werden höher eingeschätzt als die Uranvorkommen. Die Brütertechnologie eröffnet somit die Möglichkeit einer starken Vergrößerung der Reserven an Energie aus Kernspaltung.

Energiereserven

3.2 Schnelle Brüter

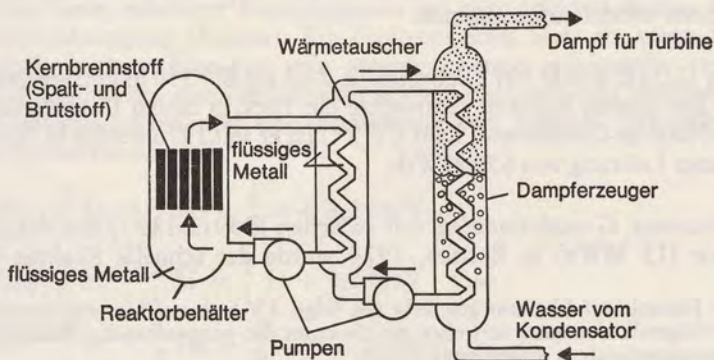
In Fig. 6 ist das Schema eines flüssigmetallgekühlten Brutreaktors dargestellt. Der Reaktorkern besteht aus bezüglich U-235 hoch angereichertem Uran oder Plutonium. Diese Zone ist von einer Brutzone umgeben, welche aus Natururan, aus bezüglich U-235 abgereichertem Uran oder aus Thorium-232 besteht. Bei der Spaltung mit schnellen Neutronen ist die Zahl η der Neutronen, die pro im Spaltstoff absorbiertes Neutron freigesetzt werden, grösser als bei der Spaltung mit thermischen Neutronen (s. Abschnitt 3.1). Ausserdem sind für schnelle Neutronen die Verluste durch unproduktiven Einfang geringer.

Aus diesem Grund wird effektives Brüten mit Vorteil in einem schnellen Reaktor erreicht. Ein solcher hat keinen Moderator, und die Neutronen haben eine mittlere Energie von einigen Zehnteln MeV. Schnelle Brutreaktoren sind ferner charakterisiert durch enggepackten Brennstoff und hohe Arbeitstemperaturen. Aufgrund der grossen Leistungsdichte des Kernes muss eine besonders intensive Kühlung für die Wärmeabfuhr sorgen. Das *Kühlmittel* muss gute Wärmeübertragungseigenschaften haben und wenig Neutronen absorbieren. Eine derartige Kühlung ist möglich durch die Verwendung von flüssigen Metallen. In den meisten geplanten flüssigmetallgekühlten schnellen Brutreaktoren ist die Benützung von flüssigem Natrium in einem primären Kreislauf vorgesehen, um die Wärme für die Erzeugung von Dampf in einen Dampfgenerator überzuführen. Die Zwischenschaltung eines sekundären Kühlkreises (flüssiges Metall) ist, aus Sicherheitsgründen, wegen der hohen chemischen Reaktivität zwischen Natrium und Wasser erforderlich.

Kühlmittel

Sekundär-
kühlkreis

Fig. 6: Das Prinzip eines flüssigmetallgekühlten Brutreaktors



3.3 Betriebserfahrung mit Prototypen Schneller Brutreaktoren

Die theoretischen Berechnungen des Brennstoffinventars, des Bruttogewinns, der Reaktivitätskoeffizienten usw. bedürfen der Bestätigung durch Experimente mit Schnellbrüter-Versuchsreaktoren und Prototypen. Im Folgenden sind bisherige Erfahrungen zusammengestellt:

Versuchs-
reaktoren

USA

In den USA wurde der Versuchsreaktor EBR I (0,2 MWe) 1951 in Betrieb genommen. 1956 schmolz sein Kern. Verbesserungen gestatteten darauf den erfolgreichen Betrieb bis 1963.

Der zweite schnelle Reaktor «Enrico Fermi» (66 MWe) wurde am 23. August 1963 kritisch. Er musste am 5. Oktober 1966 wegen eines Defekts, der zu einem teilweisen Schmelzen zweier Brennelemente führte, ausser Betrieb genommen werden.

Von 1970 bis 1972 war der Reaktor wieder in Betrieb. Dann wurde keine neue Betriebsbewilligung mehr eingeholt, da das Konzept des Reaktors inzwischen überholt war. Das Brüterprogramm der USA erlitt Verzögerungen wegen steigenden Kosten, Sicherheitsproblemen, aus politischen Gründen, und weil es wegen der grossen Uranvorräte auf dem nordamerikanischen Kontinent nicht als derart dringlich betrachtet wird. So wurde das amerikanische Projekt von Clinch River (350 MWe) sehr verzögert. In den USA steht weiterhin der Versuchsreaktor EBR II (20 MWe) zur Verfügung, und der FFTF-Reaktor (400 MWth) steht kurz vor der Inbetriebnahme. In Europa haben drei Länder industrielle Brüter-Prototypen erstellt: Der Reaktor PHENIX in Frankreich (250 MWe) wurde 1973 in Betrieb genommen. Er arbeitete während zwei Jahren sehr befriedigend (Verfügbarkeit 74%, thermodynamischer Wirkungsgrad netto 42,3%, sehr geringe radioaktive Abgaben). 1976 traten Probleme mit den mittleren Wärmetauschern auf, mit Unterbrüchen während 18 Monaten für Reparaturen und Betrieb bei $\frac{2}{3}$ der vollen Kapazität. Am 21. April 1978 wurde der Betrieb bei voller Leistung mit reparierten Wärmetauschern wieder aufgenommen.

Frankreich

UdSSR

In der UdSSR wurde 1972 der schnelle Reaktor BN 350 in Betrieb genommen. Bei diesem Reaktor verursachte ein Leck in einem Dampferzeuger einen Natrium-Grossbrand. Laut LV 5 *) ist er seit 1976 wieder in Betrieb, mit einer Leistung von 650 MWth.

Grossbritannien

In Dounreay, Grossbritannien, war zwischen 1959 und 1977 ein Versuchsreaktor (15 MWe) in Betrieb. 1974 wurde der schnelle Reaktor PFR

*) Der Hinweis auf Literatur geschieht wie folgt: LV bedeutet Literaturverzeichnis, nachfolgende Nummern verweisen auf die unter den entsprechenden Nummern im Literaturverzeichnis aufgeführten Werke.

(250 MWe) kritisch. Bei diesem Reaktor wurden bis heute, bezüglich Primärkreislauf, sehr gute Betriebserfahrungen gemacht. Zwischen geplanten Unterbrüchen wurde eine sehr hohe Verfügbarkeit von 92% erreicht.

Prototypen sind weiter in Konstruktion oder in Planung in der *Bundesrepublik Deutschland*, (Kalkar), wo schon der kleine schnelle Reaktor KNK existiert. 1978 traten wegen der Bildung von Argonblasen kurzfristige Störungen auf, die behoben werden konnten.

Deutschland

Ein Versuchsreaktor PEC in *Italien* in Brasimone, ein kleiner Reaktor Joyo in Japan sowie Versuche in Indien vervollständigen die Liste, was die kleinen Einheiten in Bau oder Betrieb anbetrifft.

Italien

Auf dem Gebiet der schnellen Brüter grosser Leistung hat die *Sowjetunion* den Bau des Reaktors BN 600 (600 MWe) begonnen, *Frankreich* macht den Sprung zu einem schnellen Brüter, SUPERPHENIX von 1160 MWe, mit dessen Bau 1977 bei Creys-Malville bei Lyon begonnen wurde.

UdSSR

Frankreich

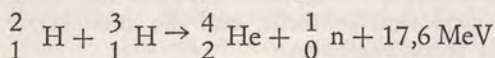
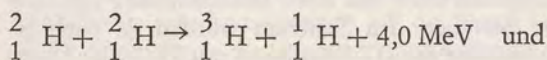
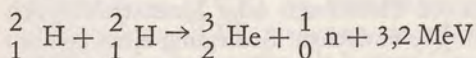
Isotopenanalysen bei der Wiederaufarbeitung von Brennstoffelementen lieferten beim PHENIX Informationen über den Brutgewinn. Dabei wurde ein Wert von 0,16 bestimmt, verglichen mit einem erwarteten von 0,13 (LV 2). Die effektive Verdopplungszeit ist ein wichtiges Charakteristikum der Wirksamkeit des schnellen Brutreaktors als Brennstoffproduzent: Unter der Verdopplungszeit versteht man die Zeit, die notwendig ist, bis soviel zusätzlicher Brennstoff erbrütet wird, wie als erste Charge eingesetzt wurde. Für den Reaktor SUPERPHENIX werden Verdopplungszeiten zwischen 25 und 50 Jahren geschätzt, je nach Lastfaktor, Abkühlzeit und Verluste.

4. Kernfusionsreaktoren

4.1 Das Prinzip der Kernfusion

Während bei schweren Kernen Energie durch Kernspaltung gewonnen werden kann, resultiert Energiegewinn bei sehr leichten Kernen durch *Kernverschmelzung* (Fusion). Ein Fusionsprozess läuft ab, wenn Kerne gewisser leichter Elemente mit grosser Energie aufeinander treffen: Daraus resultieren eine Neuordnung ihrer Protonen und Neutronen in Reaktionsprodukten und eine Freisetzung von Energie. Beispiele von Fusionsreaktionen sind:

Kernverschmelzung



Da die Kerne positiv geladen sind, muss bei Fusionsreaktionen die elektrostatische Abstossungsenergie überwunden werden. Dies bedeutet, dass die Kerne mit hinreichend grosser Geschwindigkeit, entsprechend Energien von etwa 5 keV aufeinanderprallen müssen. Derartige Energien können durch Aufheizen eines Gases auf einige 10 Millionen Grad erreicht werden. Die bei der Fusionsreaktion freigesetzte Energie liegt als kinetische Energie der Fusionsprodukte vor.

Zündtemperatur

Bedingungen

Um Energie aus Fusionsprozessen zu gewinnen, muss man *Bedingungen* schaffen, unter denen sich thermonukleare Reaktionen abspielen. Dazu sind einerseits sehr hohe Temperaturen erforderlich, damit bei Stössen die Abstossungsenergie überwunden werden kann, und andererseits muss die Anzahl der Kerne pro Volumen genügend gross sein, damit eine ausreichende Anzahl von Stössen gewährleistet ist. Thermonukleare Reaktionen spielen sich im Innern der Sonne und anderer Sterne ab, wo Temperaturen von vielen Millionen Grad herrschen. Solche Temperaturen sind auf der Erde durch Spaltbomben erzeugt worden, die man auch zur Zündung von Fusionsbomben (H-Bomben) benützt hat.

4.2 Funktionsprinzipien von Fusionsreaktoren

Es lässt sich beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse nicht voraussagen, ob und wann ein netto stromerzeugender Fusionsreaktor realisiert werden kann. In den nächsten 30 Jahren wird es vermutlich kein marktreifes System geben.

Man weiss heute, dass es im Prinzip drei Möglichkeiten gibt, die notwendigen Bedingungen (Plasma) zu erzeugen: den Gravitationseinschluss, den Trägheitseinschluss und den magnetischen Einschluss.

Trägheits-
einschluss

Der Gravitationseinschluss, der bei der Sonne zu Fusionsbedingungen führt, ist technisch nicht realisierbar. Der *Trägheitseinschluss*, der erst in letzter Zeit aktuell geworden ist, beruht darauf, dass festes Deuterium-Tritium-Gemisch (DT-Kügelchen von 1 mm Durchmesser) durch den Beschuss mit energiereichen Laserimpulsen aufgeheizt und gleichzeitig über die Festkörperdichte hinaus komprimiert wird. Diese Prozesse laufen so rasch ab, dass die Trägheit der Materie allein dazu ausreichen kann, die Fusionsbedingungen zu erfüllen.

Man wird vermutlich mit intensiven Elektronen- oder Ionenstrahlen den gleichen Effekt erzielen können. Die einfachste Auslegung eines solchen Fusionsreaktors dürfte möglicherweise aus einer Brennkammer von einigen Metern Durchmesser bestehen. Im Zentrum würden, je nach gewünschter Leistung, nacheinander die DT-Kügelchen mit Hilfe der Laser- oder Elektronenstrahlen zur Explosion gebracht, und die entstehende Fusionswärme würde durch die Wand abgeführt.

Der zweite, viel fortgeschrittenere Weg zum Fusionsreaktor nützt den Einfluss eines *Magnetfeldes* auf geladene Teilchen aus. Man hat das im sogenannten Tokamakverfahren realisiert, bei dem das Plasma durch eine elektrodensen Ringentladung in einem toroidalen Behälter erzeugt wird. Das zum Einschluss des Plasmas notwendige Magnetfeld wird durch den Ringstrom, der im Plasma induziert wird, und zusätzlich durch eine stromdurchflossene Spule erzeugt, die auf den Torus aufgewickelt ist. Das Plasma selbst besteht aus Deuterium und Tritium, und bei jedem Verschmelzungsschritt entstehen ein α -Teilchen und ein Neutron. Die Wärme wird durch die Wand abgeführt.

magnetischer
Einschluss

Bis heute ist es noch nicht gelungen, durch kontrollierte Fusion mehr Energie zu erzeugen als zu verbrauchen.

Bei der praktischen Nutzung zukünftiger Fusionsreaktoren müssen auch Nachteile wie bei der Kernspaltung in Kauf genommen werden: Erzeugung von Abwärme, Verwendung grosser Mengen von Tritium, Bildung radioaktiver Nebenprodukte (keine Spaltprodukte).

Nachteile

5. Abgaben eines Kernkraftwerkes an die Umgebung

Radioaktivitätsabgaben

Aus einem Kernkraftwerk wird Radioaktivität über den Kamin und mit dem Abwasser abgegeben. Die Abgabemengen sind abhängig vom Reaktortyp und dessen Leistung, dem Zustand der Brennstoffstäbe, den Charakteristiken der Abgasanlage und der Rückhaltevorrichtungen und anderem. Eine detaillierte Diskussion findet sich im SNG-Bericht «Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken bei Normalbetrieb».

Emissionen über den Kamin

Aus den Brennstoffelementen können durch Undichtigkeiten gasförmige radioaktive Spaltprodukte in das Kühlmittel entweichen. Im Kühlmittel selber entstehen durch Neutronenaktivierung radioaktive Gase, z. B. N-16 (Halbwertszeit 7 Sekunden). Diese *radioaktiven Gase* bleiben beim Druckwasserreaktor (PWR) im Primärkreislauf eingeschlossen; beim Siedewasserreaktor (BWR) gelangen sie mit dem Dampf aus dem nuklearen System in das konventionelle System (Turbine, Vorwärmer, Kondensator) und werden ständig zusammen mit der durch Undichtigkeiten eingedringenen Luft durch die Abgasanlage abgesogen. Die in der Abgasanlage eingebauten Abklingstrecken und Aktivkohleanlagen bewirken, dass von den radioaktiven Stoffen vorwiegend Edelgase mit verhältnismässig langer

radioaktive Gase

Halbwertszeit (Xe-133, Kr-85) sowie C-14 (in Form von $^{14}\text{CO}_2$ und Kohlenwasserstoffen) dem Kamin zugeführt werden.

Abluft

Ebenfalls durch den Kamin wird die *Abluft* aus dem (unter Unterdruck gehaltenen) Reaktorgebäude und dem Maschinenhaus abgegeben. Diese enthält, neben den durch Undichtigkeiten abgegebenen Edelgasen Krypton und Xenon, vor allem auch deren Zerfallsprodukte Rubidium und Caesium, welche sich (ebenso wie das Jod) zu einem gewissen Teil an Aerosole angelagert haben.

Emissionen mit dem Abwasser

In den Abwasseraufbereitungsanlagen wird das anfallende *Abwasser* mechanisch und chemisch gereinigt und mit dem Kühlwasser des konventionellen Systems abgeführt. Die wichtigsten hier abgegebenen Isotope sind H-3, Sr-90, Cs-137.

Abwärmeabgabe

Der Wirkungsgrad thermischer Kraftwerke erreicht höchstens ca. 40%. Im Falle eines Kernkraftwerkes mit Leichtwasserreaktor beträgt er 30 bis 35% (s. Abschnitt 6.1). Dies bedeutet, dass rund zwei Drittel der im Reaktor erzeugten Wärme als Abwärme an die Umwelt abgegeben werden müssen.

Naturzug-
Nasskühltürme

Die bestehenden Kernkraftwerke Mühleberg und Beznau geben ihre Abwärme an die Aare ab. Für weitere Kernkraftwerke in der Schweiz ist die Kühlung über *Naturzug-Nasskühltürme* vorgesehen (vgl. Tabelle 3, Kapitel 9). In diesen wird die Abwärme zur Verdunstung von Wasser eingesetzt. Der Auftrieb der erwärmten Luft führt zu einer natürlichen Ventilation (Naturzug).

Einzelheiten über die verschiedenen Kühlprinzipien finden sich im SNG-Bericht über «Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken».

6. Energiebeziehungen

6.1 Die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie

Die in thermischen Kraftwerken (Kernkraftwerken, Kraftwerken befeuert mit Erdgas, Erdöl oder Kohle) erzeugte Wärme wird in mechanische Energie (Dampfturbine) und anschliessend in elektrische Energie (Strom-generator) umgewandelt. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodyna-

mik ist der *thermodynamische Wirkungsgrad*, d. h. das Verhältnis der von der Wärmekraftmaschine geleisteten Nutzarbeit zu der für den Betrieb aufgewendeten Wärmeenergie im Falle verlustloser Prozesse

thermo-
dynamischer
Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Q_1 bzw. Q_2 ist die der Maschine zu- bzw. von ihr abgeführte Wärmeenergie; T_1 bzw. T_2 ist die absolute Temperatur der Wärme, die der Maschine zu- bzw. von ihr abgeführt wird. Verluste durch Reibung, Turbulenz und Wärmeabgabe an die Umgebung sind nicht berücksichtigt, so dass der Wirkungsgrad einer wirklichen Wärmekraftmaschine geringer ist als der oben definierte thermodynamische Wirkungsgrad.

Moderne, mit fossilen Brennstoffen beheizte Kraftwerke haben einen Wirkungsgrad von 40%, Kraftwerke mit Leichtwasserreaktoren einen solchen von ca. 33%; für Hochtemperatur-Reaktoren und für Schnelle Brüter sollen Wirkungsgrade von 40% realisiert werden.

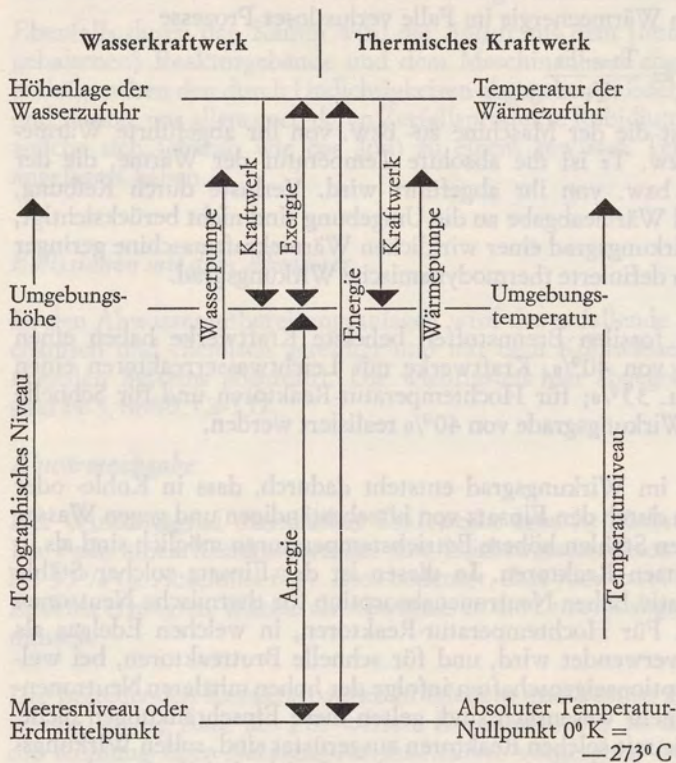
Die Differenz im Wirkungsgrad entsteht dadurch, dass in Kohle- oder Ölkraftwerken durch den Einsatz von hitzebeständigen und gegen Wasser korrosionsfesten Stählen höhere Betriebstemperaturen möglich sind als in wassermodierten Reaktoren. In diesen ist der Einsatz solcher Stähle infolge der relativ hohen Neutronenabsorption für thermische Neutronen nicht möglich. Für Hochtemperatur-Reaktoren, in welchen Edelgas als Wärmeträger verwendet wird, und für schnelle Brutreaktoren, bei welchen die Absorptionseigenschaften infolge der hohen mittleren Neutronenenergie nicht mehr wesentlich sind, gelten diese Einschränkungen nicht. Kraftwerke, die mit solchen Reaktoren ausgerüstet sind, sollen Wirkungsgrade erreichen, die denjenigen entsprechen, welche bei Kraftwerken erreicht werden, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden.

Mechanische Energie kann aus Wärme nur dadurch gewonnen werden, dass zwei Systeme, die sich nicht in einem thermischen Gleichgewicht befinden, in ein Gleichgewicht übergeführt werden. Der Begriff «Gleichgewicht» bezieht sich dabei auf die mittlere molekulare Energie, d. h. die Temperatur. Anschaulich ist ein Vergleich mit hydraulischen Kraftwerken, wo anstelle der molekularen Energie die potentielle Energie der Lage tritt.

In Fig. 7 sind die Energieumsetzungen von thermischen Kraftwerken und Wärmepumpen mit denjenigen von *Wasserkraftwerken* und Wasserpumpen verglichen. Obwohl man bei hydraulischen Energieumsetzungen im allgemeinen nicht von «Exergie» und «Anergie» spricht, sollen diese Bezeichnungen wegen der anschaulichen Analogie zwischen Temperatur- und Höhenniveau hier verwendet werden.

Vergleich ther-
mische und
Wasserkraft-
werke

Fig. 7: Vergleich der Energieumsetzung bei Wasserkraftwerken und thermischen Kraftwerken



Exergie

Mit *Exergie* bezeichnet man die unter idealen Verhältnissen maximal gewinnbare mechanische bzw. elektrische Energie. Diese ist proportional zu der verfügbaren Temperatur- bzw. Höhendifferenz.

Anergie

Mit *Anergie* wird der grundsätzlich nicht in mechanische bzw. elektrische Energie umwandelbare Teil der Energie bezeichnet. Sie ist proportional zur Differenz zwischen der Umgebungstemperatur und der Temperatur des absoluten Nullpunktes bzw. der vom Meeresniveau aus gerechneten Umgebungshöhe. Das Verhältnis der Exergie, vermindert um die Reibungsverluste, zur als Wärme zugeführten Energie wird Wirkungsgrad genannt. Die Anergie, erhöht um die Reibungsverluste, stellt die Abwärme dar.

Wärme und Wasserpumpe

In Fig. 7 ist ersichtlich, dass die *Wärmepumpe* — wie die *Wasserpumpe* — eine Umkehrung des Kraftwerksprozesses ist. Sie nimmt mechanische

bzw. elektrische Energie, also hochwertige Energie, auf und hebt Wärme von einem tieferen auf ein höheres Temperaturniveau, wo sie diese samt der selbst aufgenommenen Energie abgibt.

Aus Fig. 7 geht auch hervor, dass es einen Verlust bedeutet, wenn ein Höhen- bzw. Temperaturgefälle ohne Produktion von Arbeit durchlaufen wird. So ist es vom exergetischen Standpunkt aus schlecht, mit einer Ölf Flamme von über 1000°C direkt warmes Wasser von $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ für die Raumheizung zu erzeugen. Besser wäre der Einsatz einer Wärme-Kraft-Koppelung mit Erzeugung von mechanischer bzw. elektrischer Energie in den oberen Temperaturbereichen (Energie hoher Wertigkeit) und von Wärme für Raumheizung (Energie mittlerer Wertigkeit) in den unteren Temperaturbereichen.

Energienutzung
vom Exergie-
standpunkt aus

Schlecht vom exergetischen Standpunkt aus gesehen ist die elektrische Widerstandsheizung, bei welcher elektrische Energie (100% Wertigkeit) direkt in niederwertige Heizenergie umgewandelt wird, ohne dass für den Verlust an Wertigkeit eine Kompensation geliefert wird. Besser ist es, die elektrische Energie zum Antrieb von *Wärmepumpen* zu verwenden, so dass, als Kompensation für die Herabsetzung der Wertigkeit, zusätzlich Umgebungswärme (nullwertig) auf das für die Heizung benötigte Temperaturniveau gebracht werden kann. So können aus einer Energieeinheit elektrischer Energie mehrere Energieeinheiten Heizwärme gewonnen werden.

6.2 Vergleich zwischen Fossilenergie und Kernenergie

Bei der Verbrennung von Öl und Kohle handelt es sich um exotherme chemische Reaktionen. Kohlenstoff oder Kohlenwasserstoffe werden durch Oxydation in Kohlendioxid und Wasser übergeführt. Diese Moleküle weisen tiefere Energieniveaus als die ursprünglichen Atome oder Moleküle auf.

Bei *chemischen Reaktionen* ist nur die Elektronenhülle beteiligt, die Atomkerne bleiben unverändert. Bei den Energieumsetzungen spielen Coulomb-Potentiale (elektrostatische Anziehungsenergie) mit, welche im Abstand der Elektronenhülle vom Kern in der Größenordnung der Ionisationsenergie liegen.

Vergleich
chemischer und
Kernreaktionen

In Atomkernen werden Neutronen und sich abstossende, positiv geladene Protonen durch die Kernkräfte zusammengehalten. Bei der *Kernspaltung* haben die beiden neuen Kerne zusammen ein tieferes Energieniveau als der ursprüngliche Kern. Der Kerndurchmesser ist um 3 bis 4 Zehnerpotenzen kleiner als der Durchmesser der Elektronenhülle. Entsprechend höher ist das Coulomb-Potential. Die bei Kernreaktionen umgesetzten

Energien sind daher um mehrere Zehnerpotenzen höher als bei chemischen Reaktionen.

Vergleich
Heizwerte

Bei der Verbrennung von 1 kg Kohle werden 30 MJ (Megajoule) Energie frei; bei der Verbrennung von 1 kg Öl sind es 42 MJ. Bei der Spaltung von 1 kg Uran- oder Plutoniumkernen werden etwa $(8 \text{ bis } 10) \cdot 10^7$ MJ Energie frei. Der *Heizwert* ist für die Spaltung somit 2 bis 3 Millionen mal höher als für die Verbrennung von Kohle und Öl. Bei diesem Vergleich ist allerdings zu berücksichtigen, dass Uran in Erzen mit Urangehalten von 1% und weniger abgebaut wird, während im Falle von Kohle und Öl der Gehalt an brennbarem Material im Naturprodukt fast 100% beträgt. Ausserdem sind im Natururan nur 0,7% der Kerne (U-235) spaltbar. Der Rest besteht aus dem nicht spaltbaren U-238. Durch Neutroneneinfang entsteht aus U-238 über zwei Beta-Zerfälle Plutonium-239, welches wiederum durch langsame Neutronen gespalten werden kann (s. Abschnitt 3.1).

CO₂ und SO₂

Bei der Verbrennung von 1 kg Kohle entstehen 3,6 kg *Kohlendioxid* und Produkte von in der Kohle enthaltenen Verunreinigungen (z. B. *Schwefeldioxid*) in der Grössenordnung von wenigen Prozenten. Die Produkte der Öl- und Kohleverbrennung werden in die Biosphäre abgegeben, da sie wegen ihrer grossen Menge und ihres (teilweise) gasförmigen Zustandes kaum gelagert werden können. Ins Gewicht fällt vor allem die Abgabe von Schwefeloxiden und weltweit diejenige von Kohlendioxid.

Spaltprodukte

Bei der Spaltung von 1 kg U-235 entstehen 1 kg *Spaltprodukte*, ferner wieder als Brennstoff verwendbares *Plutonium* je nach Reaktortyp (beim Leichtwasserreaktor etwa 0,25 kg) und etwa 0,02 kg andere Transurane. Die nicht wieder verwendbaren Produkte der Kernspaltung müssen infolge ihrer Radiotoxizität ausserhalb der Biosphäre gelagert werden. Vorgesehen ist ihre Verfestigung und Lagerung in der Lithosphäre. Ein geringer Teil der gasförmigen und flüssigen Spaltprodukte wird an die Atmosphäre und das Wasser abgegeben (s. SNG-Bericht «Lagerung radioaktiver Abfälle»).

7. Betriebliche Probleme bei Leichtwasserkernkraftwerken

Auf der ganzen Welt standen Mitte 1978 64 Druck- (PWR) und 44 Siedewasserreaktoren (BWR) mit Leistungen > 100 MW in Betrieb. Ihre kumulierte Verfügbarkeit *) (Verhältnis von tatsächlich erzeugter Energie

*) Die wegen längerdauernden Nachrüstungsarbeiten abgestellten Reaktoren von Indian Point, Lingen und Gundremmingen sind hier nicht mitgezählt.

zu maximal möglicher Energieproduktion) betrug für PWR 65% und für BWR 58%. Bei den drei Schweizer Leichtwasserreaktoren liegt sie wesentlich über diesem Mittelwert. Gesamthaft (alle Reaktortypen) standen 228 Kernkraftwerksblöcke mit zusammen 117 000 MW installierter Leistung in Betrieb.

Sowohl die PWR wie auch die BWR hatten anfänglich mit einigen *Kinderkrankheiten* zu kämpfen. Bei den PWR waren es vor allem undichte Dampferzeuger (die trennende Komponente zwischen Primär- und Sekundärkreislauf), die zu Stillständen und aufwendigen Reparaturarbeiten führten. Mit geeigneteren Konstruktionsmaterialien und anderen chemischen Zusätzen im Sekundärwasser gelang es, diese Schäden weitgehend zu eliminieren. Bei den BWR waren es material- und schwingungsbedingte Rissbildungen an Leitungen und Druckgefäßeinbauten, die zu unerwünschten Stillständen führten. Auch hier konnten durch verbesserte Konstruktionen und geeignete Materialwahl die Mängel behoben werden. Die anfänglich aufgetretenen *Brennstoffschäden* (kollabierende oder gerissene Hüllen) treten heute kaum mehr auf. Verbesserte Fabrikationsmethoden und sogenannte Brennstoffschonprogramme, d. h. ein Betrieb mit langsam variierender Leistung, haben dazu geführt, dass auch höchstabgebrannte Brennelemente bis zum Schluss ihres Einsatzes völlig intakt bleiben.

Kinderkrankheiten

Brennstoffschäden

Mit zunehmendem Alter der Anlagen stehen folgende *Probleme* im Vordergrund:

Probleme

Steigende Strahlung einzelner Komponenten

Die *Ablagerung von aktivierten Korrosionsprodukten* (Kobalt, Mangan, Eisen) und von Spaltprodukten (Jod, Caesium) bewirkt in einzelnen Teilen des Kraftwerks (toten Säcken in Leitungen, Wärmeaustauschern, Armaturen etc.) eine stetige Zunahme der Strahlungsintensität. Diese Strahlung erschwert Inspektions- und Unterhaltsarbeiten, weil zusätzliche Abschirmungen aufgebaut oder die Einsatzzeiten des Wartungspersonals limitiert werden müssen. In einzelnen Anlagen wurden bereits Versuche für die Dekontamination solcher «heisser» Stellen durchgeführt. Durch bessere Anordnung und Auslegung der Leitungen ist es möglich, diese Probleme in neuen Anlagen, wenn nicht zu eliminieren, so doch stark zu vermindern.

Aktivierte Korrosionsprodukte

Korrosions- und Erosionsschäden

Korrosion und Erosion sind Schadenmechanismen, die in jedem Kraftwerk an sehr verschiedenen Stellen auftreten. Schäden lassen sich durch Reparatur (z. B. Aufplattierungen), Neuanstriche oder durch Ersetzen von Teilen (Turbinschaufeln) oder ganzen Komponenten beheben. Wenn sie sich im normalen Rahmen halten, so reicht der geplante jährliche Revisionsstillstand aus, um die Verbesserungsarbeiten auszuführen. In

einzelnen Fällen kann es aber zu Verzögerungen kommen, wenn z. B. ein Schaden erst beim Öffnen der Komponente entdeckt wird und Ersatzteile nicht auf Lager sind.

Nachrüstten

Der Stand der Sicherheitstechnik hat in den letzten Jahren eine Entwicklung durchgemacht, die es angezeigt erscheinen lässt, bei den älteren Anlagen gewisse Systeme zu verbessern oder zusätzlich einzubauen. So wurde in Beznau beispielsweise die Kernnotkühlung den heutigen Kriterien entsprechend ertüchtigt.

In Mühleberg wurde während des Sommerstillstandes 1977 die automatische Steuerung der Speisepumpen so geändert, dass diese abschalten, wenn das Wasserniveau im Reaktor eine gewisse Höhe überschreitet. Man verhindert damit ein «Überlaufen» des Gefässes, wie es in Gundremmingen im Januar 1977 geschehen ist. Dieser Vorfall führte zu Beschädigungen der Dampfleitungen, Sicherheitsventile und Einrichtungen im primären Sicherheitsbehälter.

Personal

Im Personalsektor stellen sich folgende Probleme: Verhinderung von Routineblindheit; Rekrutierung und Ausbildung von neuen Leuten (Gewährleistung der Kontinuität); Beschäftigung oder vorzeitige Pensionierung von älteren Mitarbeitern.

Der Vollastbetrieb eines Kraftwerkes kann sehr monoton sein. Es ist deshalb wichtig, vor allem das Schichtpersonal mit Hilfe von Wiederholungskursen, Notfallübungen und Simulatortraining vor Routineblindheit zu bewahren. Die Situation ist mit derjenigen von Linienpiloten vergleichbar.

Die Ausbildung von neuem Personal ist eine grosse und anspruchsvolle Aufgabe. Wie die Erfahrung zeigt, braucht ein Mann mindestens zwei Jahre, bis er eine Anlage so beherrscht, dass er in verantwortungsvoller Position (z. B. als Schichtchef) eingesetzt werden kann. Eine langfristige Personalpolitik ist deshalb unerlässlich.

An das Unterhaltspersonal werden zum Teil erhebliche körperliche Anforderungen gestellt: Arbeiten an schwierigen Stellen mit schwerem Werkzeug, Arbeiten im Schutzanzug usw. Es stellt sich hier das Problem, dass älteren Leuten gewisse Arbeiten nicht mehr zugemutet werden können. Da die Zahl der administrativen Hilfspersonen beschränkt ist, muss unter Umständen eine vorzeitige Pensionierung ins Auge gefasst werden.

8. Die Lebensdauer eines Kernkraftwerkes

Die wesentliche Komponente mit beschränkter Lebensdauer in einem Kernkraftwerk mit Leichtwasserreaktor ist das *Reaktordruckgefäss*. Alle anderen Komponenten können ohne grössere Komplikationen ausgetauscht werden. Infolge der starken Aktivierung und des grossen Gewichts ist das Auswechseln des Druckgefässes eine mühsame und kostspielige Angelegenheit. Es bestehen jedoch keine prinzipiellen technischen Schwierigkeiten.

Reaktor-
druckgefäss

Wie gross ist nun die geplante Lebensdauer eines Druckgefässes? In den Auslegungsspezifikationen geht man normalerweise von 40 Jahren aus. Massgebend sind einerseits die durch Bombardement mit schnellen Neutronen hervorgerufene Versprödung, andererseits die limitierte Anzahl thermischer Zyklen. Die experimentelle Verifikation der vorausgerechneten Alterungskurve basiert auf Materialproben, die im Druckgefäss an Stellen grösster Neutronenexposition angebracht sind. Es ist geplant, diese Proben nach gewissen Zeiten (z. B. 4, 16 und 32 Jahren) herauszunehmen und metallurgisch zu untersuchen.

Aufgrund der *bisherigen Erfahrungen* lassen sich noch keine allgemeingültigen Aussagen formulieren. Gewisse Experimente mit Materialproben zeigen, dass die 40 Jahre eher pessimistisch angesetzt sind, andere weisen wieder eher in Richtung kürzerer Lebensdauer. Bis heute wurde noch kein Leichtwasserreaktor infolge von Mängeln am Druckgefäss ausser Betrieb genommen. Die älteren Anlagen (Dresden I und Yankee Rowe) sind jetzt 18 bzw. 17 Jahre in Betrieb.

Erfahrungen

Wie überall in der Technik werden die neu erworbenen Kenntnisse zur ständigen Verbesserung der neueren Anlagen weiterverwendet. So wird z. B. heute besonders auf kleinen Cu-Gehalt in den Stählen geachtet. Die Projektion «40 Jahre Lebensdauer» hat im Jahre 1978 einen wesentlich definierten Aussagegrad als zum Beispiel im Jahre 1964, als das Kraftwerk Beznau I bestellt wurde.

In Beznau und Mühleberg werden gegenwärtig in Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung Studien für den Abbruch der Druckgefässe und der gesamten Anlage durchgeführt. Diese Studien sollen vor allem über die Kosten derartiger Unterfangen Auskunft geben.

9. Das Kernenergieprogramm der Schweiz

9.1 Gründe für die Wahl der in der Schweiz verwendeten Leichtwasserreaktoren

Bei der Wahl eines Reaktortyps spielt neben den Kriterien der Wirtschaftlichkeit, der Sicherheit und der technischen Reife vor allem die *Betriebs-*

Betriebserfahrung

erfahrung eine entscheidende Rolle. Voraussetzung für die Entscheidung zugunsten eines bestimmten Reaktortyps ist der Nachweis einer guten Verfügbarkeit über eine längere Zeitdauer. Dies führt zu einer positiven Rückkopplung: Je mehr Reaktoren eines bestimmten Typs erstellt worden sind, desto grösser ist die Betriebserfahrung sowohl auf Ersteller- wie auch auf Betreiberseite. Das so reduzierte wirtschaftliche Risiko bildet ein wesentliches Argument für die Wahl eines bewährten Systems.

Dass alle Schweizer Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren ausgerüstet sind, widerspiegelt die oben geschilderte Gesetzmässigkeit. Weil sowohl *Druckwasser- als auch Siedewasserreaktoren* gegenüber den anderen Typen einen derartigen *Erfahrungsvorsprung* aufweisen, steht im Moment für die Schweiz kein anderer Typ in Betrieb oder im Bau.

Als der Baubeschluss für Beznau und Mühleberg gefasst wurde, wiesen neben den Leichtwasserreaktor-Typen nur noch die englischen und die französischen Magnox-(Gas-Graphit)-Typen eine äquivalente Erfahrung auf. Infolge der deutlich höheren Energiegestehungskosten konnten sie sich auf dem Weltmarkt jedoch nicht durchsetzen.

PWR und BWR sind sich, wie die Rasmussen-Studie zeigt, vom sicherheitstechnischen Standpunkt aus ebenbürtig (vgl. auch SNG-Bericht «Sicherheit der Kernkraftwerke»). Auch bezüglich der Energiegestehungskosten ist bis jetzt kein wesentlicher Unterschied festzustellen. Während sie lange Zeit etwa mit gleicher Zahl zu Buch standen, hat sich in den letzten Jahren eine deutliche Entwicklung zugunsten des PWR ergeben.

Von der Vielzahl der ursprünglich verfolgten weiteren Reaktortypen spielt im heutigen Zeitpunkt nur noch der kanadische Schwerwasserreaktor eine einigermaßen bedeutsame Rolle. Der Hochtemperaturreaktor ist infolge mangelnder Betriebserfahrung zurückgefallen. Obschon in Frankreich eine 250-MW-Anlage mit einem Schnellen Brüter vor drei Jahren in Betrieb genommen wurde, wird es bis zur Marktreife dieses Typs noch Jahre dauern. Neben gewissen grundsätzlichen Sicherheitsfragen, die bei diesem Typ auftreten, muss noch die ganze Technologie des Plutoniumkreislaufes entwickelt werden. Im Gegensatz zu der Fusionstechnologie handelt es sich hier jedoch um bereits überblickbare Probleme.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Leichtwasserreaktoren heute in jeder Beziehung Vorteile aufweisen, die von keinem Reaktortyp so schnell aufgewogen werden können. Da ihr Entwicklungspotential nicht ausgeschöpft ist, wird sich diese Situation in den nächsten 10 bis 20 Jahren kaum wesentlich ändern.

9.2 Kernkraftwerke in Betrieb und im Bau in der Schweiz

In Tabelle 2 sind die Produktionsdaten der sich in Betrieb befindenden Schweizer Kernkraftwerke zusammengestellt und zur gesamten Produktion an elektrischer Energie in Beziehung gebracht. Der Anteil der Elektrizität am gesamten Energieverbrauch der Schweiz beträgt ca. 17⁰‰.

Tabelle 2: Produktionsdaten der Kernkraftwerke Beznau I und II (KKB I und II) und Mühleberg (KKM)

	Brutto-Produktion (in TWh)			Seit Betriebsaufnahme bis Ende 77	Netto-Produktion Betriebsaufnahme bis Ende 77 (TWh)	kumulierte Arbeitsverfügbarkeit bis zum 30. 6. 78 (‰)	Kernenergieproduktion in ‰ des Landes-Elektrizitätsverbrauchs			
	1975	1976	1977				1974/5	1975/6	1976/7	1977/8
							(hydrograph. Jahr)			
KKB-I	2.61	2.55	2.71	17,83	16,98	66,7				
KKB-II	2.66	2.65	2.81	16,02	15,34	81,5	22,8	22,9	22,4	22,6
KKM	2.46	2.36	2.55	12,43	11,80	82,1				

Tabelle 3 beschreibt die Schweizer Kernkraftwerke.

Tabelle 3: Beschreibung von Schweizer Kernkraftwerken, die in Betrieb oder im Bau sind

Standort	Typ	Betreiber	Hersteller des nuklearen Dampferzeugersystems	Kühlung	Netto-Leistung MW	Anteil Schweiz ‰	Stand
Beznau I	PWR	NOK	Westinghouse	Flusswasser-Durchlauf	350	100	Betrieb
Beznau II	PWR	NOK	Westinghouse	Flusswasser-Durchlauf	350	100	Betrieb
Mühleberg	BWR	BKW	GETSCO	Flusswasser-Durchlauf	315	100	Betrieb
Gösgen-Däniken	PWR	KKG AG	Kraftwerk Union	1 nasser Naturzugkühlturm	920	100	Bau
Leibstadt	BWR	KKL (EWI)	BBC-GETSCO	1 nasser Naturzugkühlturm	942	87,5	Bau

Literaturverzeichnis

- (1) Ardley, N.: Atom und Energie, Neuer Tesseloff-Verlag, Hamburg, 1976.
- (2) Barnert, H.: Energieerzeugung durch Kernspaltung, aus Berichte der Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Conf-17, November 1975.
- (3) dtv-Atlas zur Atomphysik — Tafeln und Texte, Deutscher Taschenbuch-Verlag, München, 1976.
- (4) Emendorfer, D. und Höcker, K. H.: Theorie der Kernreaktoren, Teil 1 und 2, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1969.
- (5) IAEA-SM-225/60, D. S. Yurchenko: Operating Experience of the BN-350 Fast Reaktor, Symp. on Design, Construction and Operating Experience of Demonstration LMFBRS, Bologna, 10-14 April 1978.
- (6) Jouillard, J.: Das Atom als Energiequelle, Hallwag-Verlag, Bern, 1973.
- (7) Kessler, F. R.: Einführung in die physikalischen Grundlagen der Kernenergiegewinnung, Wissenschaftliche Taschenbücher, Band 60, Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig, 1969.
- (8) Lindackers, K. H.: Kernenergie — Nutzen und Risiko, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart, 1970.
- (9) Michaelis, H.: Kernenergie, Deutscher Taschenbuch-Verlag, München, 1977.
- (10) NUCLEX 78, A 2/1, F. Conte et M. Bronon: Quatre ans d'exploitation de PHENIX.
- (11) Oldekop, W.: Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke, Karl Thieme Verlag, München, 1974.
Einführung in die Kernreaktor- und Kernkraftwerkstechnik: Teil 1 — Kernphysikalische Grundlagen, Reaktorphysik, Reaktordynamik, Teil 2 — Wärmetechnik, Werkstoffe, Sicherheit, Reaktortypen, Verlag Karl Thieme, München, 1975.
- (12) Schmidt, G.: Kernenergie — Fakten und Prognosen, Safari-Verlag, Berlin, 1970.
Problem Kernenergie — eine kritische Information, Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig, 1977.
- (13) Smidt, D.: Reaktortechnik: Band 1 — Grundlagen, Band 2 — Anwendungen, G. Braun Verlag, Karlsruhe, 1971.
- (14) Winkler, W. und Hintermann, K.: Repetitorium der Physik, Teil I, Diesterweg-Salle-Sauerländer, 1978.
- (15) Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie, eine Dokumentation der Bundesregierung, Bonn 1977, BMFT, Stresemannstrasse 2, 5300 Bonn, Bad Godesberg.

Die Wahl des Standortes von Kernkraftwerken

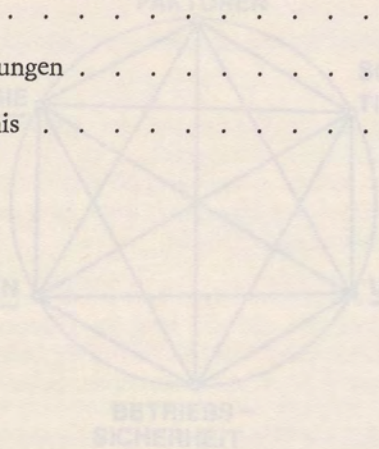
1. Zusammenfassung	49
2. Naturwissenschaftlich-geographische Standortfaktoren	50
2.1 Meteorologie	54
2.2 Hydrologie	60
2.3 Geologie	66
2.4 Seismik	76
2.5 Bevölkerungsverteilung	77
3. Bemerkungen zu sechs möglichen Standortvarianten innerhalb der Schweiz	87
4. Schlussbemerkungen	90
Literaturverzeichnis	93

Dieser Bericht wurde erarbeitet von:

Prof. Dr. Franz Allemann, Geologe, Bern
Dr. Herbert Lang, Geophysiker, Zürich
Dr. Dieter Mayer-Rosa, Physiker, Zürich
Dr. Erich Nagel, Geograph, Würenlingen
Dr. Heinz Wanner, Geograph, Bern

Inhalt

1. Einleitung	49
2. Zusammenfassung	50
3. Naturwissenschaftlich-geographische Standortfaktoren	
3.1 Meteorologie	54
3.2 Hydrologie	60
3.3 Geologie	66
3.4 Seismik	70
3.5 Bevölkerungsverteilung	77
4. Bemerkungen zu sechs möglichen Standortvarianten innerhalb der Schweiz	87
5. Schlussbemerkungen	90
Literaturverzeichnis	93



Die obige Darstellung ist klar zu erkennen, dass die naturwissenschaftliche Seite nur einen Teil der zu betrachtenden Bereiche ausmacht. Der vorliegende Bericht konzentriert sich vor allem auf wichtige naturwissenschaftlich-technologische Faktoren und kümmert sowohl ökonomische als auch soziale und politische Aspekte auftragsgemäss um, was nicht als Ergänzung durch die Gruppe verstanden werden darf.

Naturwissenschaftliche Faktoren

Im Entscheidungsmodell (Fig. 1) wurden deshalb jene drei Teilbereiche der Standortbewertung unberücksichtigt, welche im vorliegenden Bericht nicht behandelt werden. Der Schwerpunkt liegt also eindeutig auf der Bewertung der ausgehenden Naturfaktoren und deren Verknüpfung mit

Standort

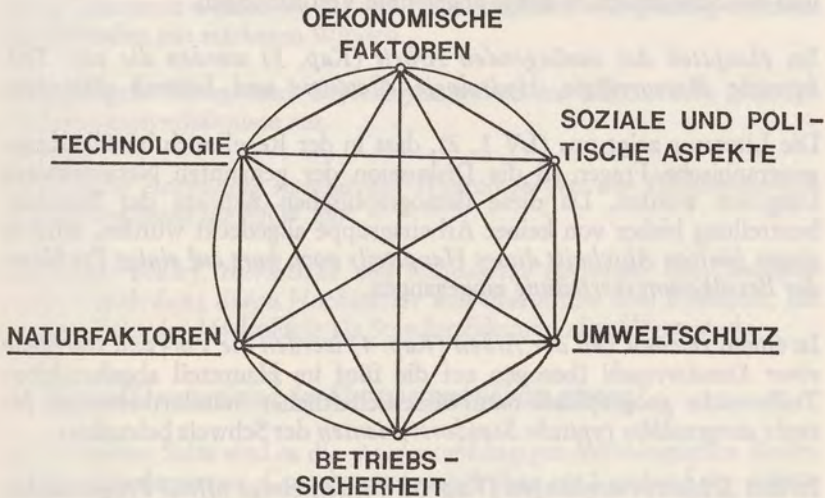
Der Hinweis auf Lärmschutz geschähe wie folgt: LV bedeutet Lärmschutzverordnungen, die folgende Ziffern verweisen auf die unter den entsprechenden Nummern im Lärmschutzkataster aufgeführten Werte.

1. Einleitung

Die Diskussion in der Arbeitsgruppe «Standorte» hat erneut bestätigt, dass das komplexe *Problem der Standortwahl* eines Kernkraftwerkes (KKW) mit einem breiten Spektrum von Faktoren verknüpft ist. Das stark vereinfachte Schema der Figur 1 zeigt einen Überblick über dieses schwer durchschaubare Faktorengefüge.

Standort-
faktoren

Fig. 1: Stark vereinfachtes Beziehungsmodell, das uns die wichtigsten Bereiche des weit gefächerten Faktorengefüges zeigt, das bei einer KKW-Standortwahl berücksichtigt werden sollte (nach LV 1 *). Die Berichte der SNG nehmen zu den Teilbereichen Technologie, Naturfaktoren, Betriebssicherheit und Umweltschutz Stellung.



Aus dieser Darstellung ist klar zu erkennen, dass die *naturwissenschaftliche Seite nur einen Teil der zu beachtenden Bereiche ausmacht*. Der vorliegende Bericht konzentriert sich vor allem auf wichtige naturwissenschaftlich-technologische Faktoren und klammert sowohl ökonomische als auch soziale und politische Aspekte auftragsgemäss aus, was nicht als Gewichtung durch die Gruppe verstanden werden darf.

Naturwissen-
schaftliche
Faktoren

Im Beziehungsmodell (Fig. 1) wurden deshalb jene drei Teilbereiche der Standortbeurteilung unterstrichen, welche im vorliegenden Bericht teilweise behandelt werden. Der *Schwerpunkt* liegt also eindeutig auf der *Diskussion der massgebenden Naturfaktoren und deren Verknüpfung mit*

Schwerpunkt

*) Der Hinweis auf Literatur geschieht wie folgt: LV bedeutet Literaturverzeichnis, nachfolgende Ziffern verweisen auf die unter den entsprechenden Nummern im Literaturverzeichnis aufgeführten Werke.

Fragen des Umweltschutzes und der heute gebräuchlichen Technologie. Dabei muss betont werden, dass wichtige Spezialfragen bereits von den Arbeitsgruppen «Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke», «Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken», «Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken bei Normalbetrieb» sowie «Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung» behandelt wurden. Zudem wird in zahlreichen Studien über die in der Schweiz bestehenden oder geplanten KKW Stellung zu den in diesem Bericht behandelten Faktoren genommen. Für jede vom Bundesrat erteilte Standortbewilligung muss die speziell dafür eingesetzte *Kommission für die Sicherheit von Atomanlagen (KSA)* detaillierte Untersuchungen über die für den Schutz der Menschen und der gesamten Umwelt wichtigen Kriterien vorlegen. Richtungsweisend ist dabei das Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Strahlenschutz sowie abgeleitete Verordnungen.

Kommission für
die Sicherheit
von Atomanlagen

Im Hauptteil der vorliegenden Arbeit (Kap. 3) werden die vier Teilbereiche Meteorologie, Hydrologie, Geologie und Seismik diskutiert.

Meteorologie,
Hydrologie,
Geologie,
Seismik und
Bevölkerungs-
verteilung

Die Literatur zeigt uns (LV 1, 2), dass in der Regel auch bevölkerungsgeographische Fragen in die Diskussion der genannten Naturfaktoren integriert werden. Da diese demographischen Aspekte der Standortbeurteilung bisher von keiner Arbeitsgruppe abgedeckt wurden, wird in einem fünften Abschnitt dieses Hauptteils noch kurz auf einige Probleme der Bevölkerungsverteilung eingegangen.

In einem zweiten Teil der Arbeit (Kap. 4) werden die Vor- und Nachteile einer Standortwahl (bezogen auf die fünf im Hauptteil abgehandelten Teilbereiche geographisch-naturwissenschaftlicher Standortkriterien) für sechs ausgewählte typische Standortvarianten der Schweiz beleuchtet.

In den Schlussbemerkungen (Kap. 5) werden einige offene Fragen diskutiert, die Zusammenfassung (Kap. 2) trägt die Form eines Fragenkataloges. Schliesslich vermittelt uns das Literaturverzeichnis die Möglichkeit einer breiteren Information.

* * *

2. Zusammenfassung

2.1 Welchen meteorologischen Faktoren kommt bei der Standortwahl eines KKW eine grosse Bedeutung zu?

Um die Ausbreitung der Radioaktivität, des ausgestossenen Wasserdampfes sowie den Einfluss der Wärmeabgabe studieren zu können, muss

man in erster Linie die folgenden *meteorologischen Faktoren* berücksichtigen (vgl. Tab. 1): Wind, Temperatur, Bewölkung und Sonnenscheindauer, spezifische Feuchte, Nebel.

meteorologische
Faktoren

2.2 Wovon sind die Ausbreitungsverhältnisse radioaktiver Schadstoffe abhängig? Treten typische lokale Unterschiede auf?

Sie sind abhängig von den *meteorologisch-topographischen Verhältnissen* sowie von der *Bodenrauhigkeit*.

Meteorologie,
Topographie und
Bodenrauhigkeit

Tal- und Muldenlagen weisen häufig ungünstige Ausbreitungsverhältnisse auf, welche auf Schwachwinde und Temperaturinversionen zurückzuführen sind. Letztere treten vor allem nachts und im Winterhalbjahr auf. In dieser Jahreszeit werden sie oft von Nebel begleitet. Als günstig erweisen sich Perioden mit stärkeren Winden.

Hochgelegene Hang- und Gipfellagen weisen im allgemeinen günstige Ausbreitungsverhältnisse auf.

2.3 Welche Bedeutung kommt der Hydrologie bei der Diskussion von Standortkriterien für KKW zu?

Kühlwasserbedarf, thermische und radioaktive Belastung der Gewässer sowie Gefährdung durch Hochwasser und Flutwellen sind Probleme, die aus der Sicht der Hydrologie als Standortfaktoren abzuklären sind.

Hydrologische
Standort-
faktoren

2.4 Welche Grenzen sind der Flusswasserkühlung gesetzt?

Auf der einen Seite sind es die *standortabhängigen hydrologischen Bedingungen* (Niederwasser, Grundwasserverhältnisse etc.) und auf der andern Seite die *Vorschriften zum Schutz der Gewässer*, welche der Kühlwasserentnahme und der Kühlwasserrückgabe von KKW-Anlagen eindeutige Grenzen setzen.

standort-
abhängige
Bedingungen,
Gewässerschutz-
vorschriften

2.5 Gibt es in der Schweiz Standorte, die durch Hochwasser besonders gefährdet sind?

Grundsätzlich sind die meisten *Tallagen* einem bestimmten Hochwasserisiko ausgesetzt. Die Rückhaltewirkung von Seen und künstlichen Stauwerken vermindert in vielen Fällen die durch starke Niederschläge bedingte Hochwassergefahr für die stromabwärts liegenden Gebiete. Hochwasserereignisse wie z. B. das Katastrophenhochwasser vom 7./8. August 1978 (Thurgau, Tessin) zeigen, dass die bisherigen Grundlagen zur sicheren Abschätzung der Hochwasserrisiken offenbar noch verbesserungsbedürftig sind.

Tallagen

Ein weiteres standortbedingtes Hochwasserrisiko *bilden die gefüllten Stauräume* im Hinblick auf einen Talsperrenbruch, obwohl dieses Ereignis äusserst unwahrscheinlich ist. Dabei wäre noch zu beachten, dass ein Erdbeben, welches einen Talsperrenbruch mit Flutwelle verursacht, gleichzeitig einen Störfall an einem nahegelegenen KKW auslösen könnte.

2.6 In welchem zeitlichen und räumlichen Skalen-Bereich kann ein KKW-Störfall zur unkontrollierten Ausbreitung von radioaktiven Stoffen im Wasserkreislauf führen?

Der hypothetische Fall einer radioaktiven Gewässerkontamination sei hier genannt, ohne auf Art und Ausmass der Kontamination einzugehen. Im Flussgerinne *breitet sich die Kontamination unter Verdünnung etwa mit der Fliessgeschwindigkeit des Flusses* aus. Durch Flussinfiltration kann eine mitgeführte Kontamination ins Grundwasser gelangen. Bei Hochwasser (starke Verdünnung) kann in Überschwemmungsgebieten die Kontamination je nach Bodenart innerhalb von Stunden oder Tagen ausge dehnte Grundwasservorkommen erreichen, einschliesslich der darüber liegenden Bodenschichten. Die *Aufenthaltsdauer* in Grundwasser, Bodenwasser und Seen bewegt sich im *Skalenbereich von Tagen, Monaten, Jahren*. Dasselbe gilt natürlich auch für Niederschlagswasser und mitgeführte Schadstoffe.

2.7 Welche geologischen Faktoren spielen bei der Standortwahl eine wichtige Rolle?

Je nach regionalen oder lokalen Gegebenheiten spielt *die Geologie eine erhebliche Rolle* (speziell im Zusammenhang mit seismologischen und hydrogeologischen Erwägungen). Für schweizerische Verhältnisse gibt es weder anerkannte Normen noch eine Gewichtung von geologischen Faktoren.

Wichtig sind:

Zusammenhänge zwischen *Bruchsystemen und Seismizität* im Nahbereich, *Art des Untergrundes*, d. h. Foundation auf Fels oder auf Lockergestein bei Standorten in- oder ausserhalb von Grundwasserleitern,

Hydrogeologie: Kontamination der Grundwasserleiter durch Radionuklide sowie Fundationsprobleme,

Stabilität des Baugrundes und der benachbarten Hänge, direkte und indirekte Beeinflussung des Standortes durch *Massendislokationen*,

geotechnische Parameter und *Wasserführung* von Gesteinen beim Kavernenbau,

Gesteinsverhältnisse bei eventueller Kombination von Standorten mit der Lagerung radioaktiver Abfälle.

2.8 Wie muss bei der geologischen Beurteilung eines Standortes vorgegangen werden?

Regionalgeologische Vorabklärungen können teilweise *ohne langfristige Felduntersuchungen* durchgeführt werden. Dies gilt nicht für die Beurteilung der Bruchsysteme und die Beantwortung der Risikofrage bei Massenbewegungen. Die *detaillierten geologischen Abklärungen* des Standortes und des Nahbereiches müssen vor der Wahl des Standortes vorliegen und berücksichtigt werden. Die Resultate der geologischen Untersuchung sind durch ein *für jeden Einzelfall einzuberufendes Gremium unabhängiger Fachleute*, welche nicht an der Begutachtung des Standortes beteiligt waren, zu überprüfen.

Vorabklärungen

detaillierte
Abklärungen

2.9 Was muss künftig aus geologischer Sicht vermehrt berücksichtigt werden?

- Dass es *keine normativen Werte* der geologischen Beurteilbarkeit gibt (mit Ausnahme von Baugrund, Stabilitäts- und gewissen hydrogeologischen Werten);
- dass mehr *Ausweichmöglichkeiten* gegenüber den heutigen Standorten geprüft werden, z. B. auf oder im Fels oberhalb den bislang bevorzugten Tallagen;
- dass kombinierte *interdisziplinäre Untersuchungen*, besonders geologisch-seismologischer Art, zu forcieren sind;
- dass der Möglichkeit von *Kavernenwerken* mehr Beachtung geschenkt wird.

normative Werte

Ausweich-
möglichkeiten

Interdisziplinäre
Untersuchungen

Kavernenwerke

2.10 Besteht in der Schweiz überhaupt eine nennenswerte Erdbebengefährdung?

Gemessen an anderen Ländern in Europa ist in der Schweiz mit einem *mittleren Erdbebenrisiko* zu rechnen. Sehr starke Beben mit grösseren Schäden können zwar auftreten, dürften aber eher selten sein. Damit ist die Situation ähnlich wie in Süd-Deutschland, Österreich und Frankreich. Länder wie z. B. Italien, Jugoslawien und Griechenland weisen im Vergleich zur Schweiz eine höhere seismische Aktivität auf.

mittleres
Erdbebenrisiko

2.11 Welches sind in der Schweiz die Gebiete mit höherer oder geringerer Erdbebengefährdung?

Eine sorgfältige Analyse der Erdbebengefährdung in der Schweiz hat gezeigt, dass die *Gebiete mit höherer Erdbebengefährdung im Wallis, Engadin, St. Galler Rheintal und in den Regionen Basel und Genf* zu finden sind, während die weniger gefährdeten Gebiete im Jura, Mittelland und Tessin liegen. Man kann in jedem Fall quantitativ angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit starke Beben auftreten können.

Gebiete mit
höherer
Erdbeben-
gefährdung

2.12 Wie werden Erdbeben bei KKW berücksichtigt?

starke Beben

Bei der Konstruktion und beim Bau eines KKW muss allgemein die *dynamische Belastung durch starke Beben* berücksichtigt werden. Es wird diejenige grösstmögliche Bodenerschütterung durch Erdbeben angenommen, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.0001 pro Jahr auftreten kann. Das Beben, das Ursache für diese Erschütterung ist, wird üblicherweise «*Sicherheitsbeben*» genannt. Tritt dieses ein, muss die Anlage sicher abgeschaltet werden können, ohne dass irgendwelche Radioaktivität nach aussen dringt.

Sicherheitsbeben

2.13 Welche Bedeutung kommt der Bevölkerungsverteilung um den Standort eines KKW zu?

kollektive
Strahlen-
gefährdung

Angaben über die Bevölkerungsverteilung im Gebiet der KKW-Standorte erlauben es, die *kollektive Strahlengefährdung* abzuschätzen. Aus diesem Grunde sind Kenntnisse über die Bevölkerungsverteilung in den verschiedenen natürlichen Raumeinheiten der Schweiz unerlässlich. Dies gilt besonders auch für die nähere Umgebung eines jeden KKW-Standortes. Strahlenbelastungen der Bevölkerung sind so niedrig wie möglich zu halten, was eine besondere Verpflichtung zu einer sorgfältigen Betrachtung der Bevölkerungsverhältnisse in der Umgebung solcher Anlagen im Hinblick auf die Abgabe radioaktiver Schadstoffe (z. B. Störfall) bedeutet.

2.14 Besteht eine Möglichkeit, KKW in den weniger dicht besiedelten Gebieten der Schweiz aufzustellen?

Standort möglich
verschiedene
Faktoren wichtig

Grundsätzlich ist ein *solcher Standort möglich*. Ausser der Bevölkerung müssen jedoch noch *andere Faktoren* berücksichtigt werden, wie genügende Kühlwasserversorgung, geologische und bodenmechanische Verhältnisse, Meteorologie, geeignete Verkehrswege und sicherer Anschluss an das Hochspannungsnetz. Als bevölkerungsarm erweisen sich in unserem Land vor allem die Hang- und Hochlagen des Juras und der Alpen.

3. Relevante geographisch-naturwissenschaftliche Standortfaktoren

3.1 Meteorologie

Einleitende Bemerkungen

Das Studium der bekannten Literatur zeigt, dass Meteorologie und Lufthygiene unter die wichtigsten Faktoren zur Beurteilung eines möglichen KKW-Standortes eingereiht werden müssen. Dabei ist neben der Abschätzung der Einwirkungen der atmosphärischen Vorgänge auf das zu

erstellende KKW noch viel mehr die Frage nach den *Auswirkungen des KKW selbst auf die Umwelt* von Bedeutung (LV 1—7).

Auswirkungen
der KKW auf
die Umwelt

Vereinfacht können diese Einflüsse in *vier Bereiche* aufgespalten werden:
a) Thermische Auswirkungen, b) mechanische Einwirkungen, z. B. Starkwinde und Frost, c) Ausstoss von Schadstoffen, z. B. Radioaktivität, d) Einflüsse durch ausgestossenen Wasserdampf.

vier Bereiche

Einzelne Teilbereiche (vor allem a) sind bereits von den Arbeitsgruppen «Thermische Auswirkungen» und «Emission radioaktiver Stoffe aus KKW bei Normalbetrieb» behandelt worden (LV 8). Tabelle 1 zeigt die *wichtigsten meteorologisch-lufthygienischen Faktoren*, die bei der Standortwahl eines KKW berücksichtigt werden müssen.

wichtigste
Faktoren

Mechanische Einwirkungen

Den *mechanischen Einwirkungen extremer meteorologischer Bedingungen*, z. B. Starkwind und Frost, sind mit der nötigen Sorgfalt zu begegnen. Durch bauliche und andere geeignete Massnahmen soll den Einwirkungen starker Winde oder tiefer Temperaturen auf empfindliche Baustrukturen (vor allem auf Kühltürme) entgegengewirkt werden. Namentlich in Föhn-tälern (Beispiel: Altdorf) treten Starkwinde aus südlicher Richtung mit Geschwindigkeiten bis zu 140 km/h auf.

mechanische
Einwirkungen

Zur Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe

Der möglichen *Ausbreitung von Schadstoffen, insbesondere von Radioaktivität*, kommt neben den thermischen Auswirkungen und dem Einfluss des ausgestossenen Wasserdampfes eine zentrale Bedeutung zu. Deshalb soll hier diese Frage in den Vordergrund gestellt werden. Es ist jedoch nicht möglich, näher auf die *verschiedenen Modelle über die Ausbreitung von Schadstoffen* in der Atmosphäre einzugehen; darüber existiert eine *umfangreiche Literatur*, auf die verwiesen werden kann (LV 3, 4, 7, 9—13). Grundsätzlich ist zu bemerken, dass diese Ausbreitung durch turbulente Diffusion erfolgt. Diese ist abhängig von der Bodenrauigkeit, der Topographie sowie von den meteorologischen Verhältnissen. In allen Modellansätzen sind die beiden meteorologischen Parameter Windfeld und vertikale Temperaturschichtung massgebend. Sie wurden deshalb auch in Tabelle 1 an die erste Stelle gesetzt.

Ausbreitung von
Radioaktivität

Literatur über
Ausbreitungs-
modelle

Die *Windverhältnisse geben Auskunft über die Richtung und die Geschwindigkeit des Transportes von Pollutanten* sowie über den Vermischungsgrad derselben in der Atmosphäre. In allen Diffusionsformeln steht deshalb die Windgeschwindigkeit $\bar{u}$ im Nenner ($\frac{1}{\bar{u}}$): Je grösser die

Windverhältnisse

Windgeschwindigkeit, desto besser wird die Verdünnung sein und umgekehrt. Für die Bestimmung der Durchmischungsart der ausgestossenen

Tabelle 1: Katalog der wichtigsten meteorologisch-lufthygienischen Faktoren, die bei der Standortwahl eines Kernkraftwerkes berücksichtigt werden müssen.

1. Wind

- Korrelation Windfeld — Wetterlage
- Extremsituationen (Starkwinde, Schwachwinde)
- Windrichtungsverteilung; Persistenz von Strömungslagen

2. Temperaturgradient

- Korrelation Temperaturfeld — Wetterlage
- Vertikale Temperaturverteilung innerhalb der Grundsicht
- Stabilitätskategorien (Häufigkeit und Persistenz)

3. Bewölkung, Nebel, Dunst

- Korrelation räumliche Verteilung — Wetterlage
- Häufigkeiten im Jahresverlauf (insbesondere bodennahe Schönwetternebel)

4. Niederschlag, Luftfeuchtigkeit

- Korrelation räumliche Verteilung — Wetterlage
- Niederschlagshäufigkeit und -intensität
- Spezifische Feuchte

5. Sonnenscheindauer, Strahlung

- Absolute und relative Sonnenscheindauer im Jahresverlauf
- Korrelation Strahlungsbilanz — Wetterlagen

6. Lufthygiene

- Korrelation Windrichtung — Stabilitätskategorie — Wetterlage
- Bestimmung der kritischen Geländepunkte (Orte, an denen im Jahresmittel die grössten Immissionen auftreten).

vertikaler
Temperatur-
gradient

Wetterlage und
Sonnen-
einstrahlung

Emissionsstoffe wäre es ferner von grossem Nutzen, auch die vertikale Windkomponente messen zu können. Da sich diese aber nur mit grossem Aufwand bestimmen lässt, behilft man sich mit dem *vertikalen Temperaturgradienten*, der ein *geeignetes Mass für den vertikalen Austausch* darstellt. Mit diesen Parametern ist es möglich, die Stabilitätsverhältnisse der Atmosphäre zu bestimmen und Diffusionskategorien zu unterscheiden. Auf dieser Grundlage beruhen die verschiedenen Einteilungen, die in der Praxis benutzt werden, wobei jene von Pasquill (LV 4, 14) am bekanntesten ist. Die Stabilitätsverhältnisse werden *neben der allgemeinen Wetterlage stark von der Sonneneinstrahlung* bestimmt. Tagsüber treten wegen der vorherrschenden Konvektion am häufigsten turbulente Diffusionsverhältnisse auf, und nachts herrschen infolge der Ausstrahlung häufig stabile Verhältnisse mit Temperaturinversionen. Diese Temperaturinversionen können in den verschiedensten Regionen vorkommen. In der Schweiz wird ihre Bildung durch bestimmte topographische Verhältnisse begünstigt (grosse Häufigkeit in Tal- und Muldenlagen).

Im Aaretal bei Würenlingen wurden nach langjährigen Messungen in rund 47% (49% im Sommer bzw. 45% im Winterhalbjahr) der Zeit turbulente Diffusionsbedingungen ermittelt, bei denen Windgeschwindigkeiten von > 2 m/sec. herrschten. In rund 41% (45% im Sommer-, bzw. 36% im Winterhalbjahr) der Zeit wurden Inversionen — also stabile Verhältnisse — beobachtet, bei denen nur schwache Winde vorherrschten (< 2 m/sec). In der übrigen Zeit herrschten komplexere Verhältnisse (LV 15, 16). Im Sommerhalbjahr treten öfter Inversionen auf als während der kalten Jahreszeit. Sie sind dann von kürzerer Dauer (mittlere Dauer: 14 Stunden) als im Winter, wo sie vereinzelt über mehrere Tage andauern (in Würenlingen dauern 7% der Inversionen des Winterhalbjahres länger als 24 Stunden).

Inversionen

Der Bedeutung der *Verdünnung von Schadstoffen zum Schutze der Umwelt* ist bereits in früheren Zeiten Rechnung getragen worden, indem die Emissionen durch Hochkamine erfolgten. Das gilt heute auch für Kernanlagen. Die effektive Höhe der Abgaben über dem Boden verbessert die Verdünnung: In der Höhe herrschen stärkere Winde als in Bodennähe, und die Schadstoffe werden besser verdünnt, bevor sie den Boden erreichen.

Verdünnung
durch
Hochkamine

Der *Punkt höchster Konzentration innerhalb der bodennahen Luftschicht (kritischer Geländepunkt)* liegt aufgrund von Berechnungen bei einem trockenadiabatischen Temperaturgradienten, einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/sec, einem Hochkamin von 70 m Höhe (Hochkamin des Eidg. Instituts für Reaktorforschung in Würenlingen), bei ebenem Gelände und ohne Berücksichtigung der Bodenrauigkeit in einer Entfernung von rund 1100 m (Fig. 2, LV 16). Untersuchungen in der Kernforschungsanlage Jülich (LV 11) haben aber gezeigt, dass bei Berücksichtigung einer mässigen Bodenrauigkeit (Wald, wenig Gebäulichkeiten) dieser Punkt bereits in etwa 600 m zu liegen kommt (linke gestrichelte Kurve in Fig. 2). Der Verdünnungsfaktor wird im letzten Fall bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/sec rund $5 \cdot 10^{-6}$ sec/m³ betragen.

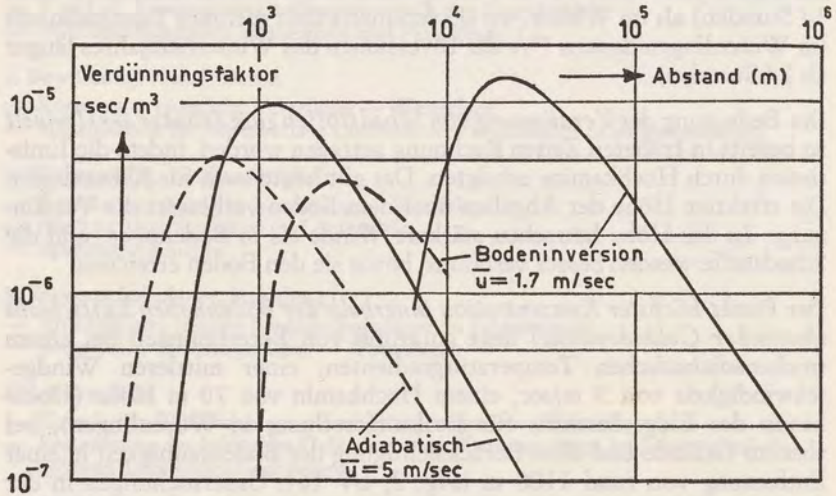
kritischer
Geländepunkt

Bei stabilen Verhältnissen (Inversionen), die von schwachen Winden begleitet sind, wird die mechanische (evtl. auch die thermische) Überhöhung der ausgestossenen Abluft verstärkt, und diese wird den Boden infolge der ungünstigeren Durchmischungsverhältnisse erst in einer grösseren Entfernung von der Quelle erreichen; der Verdünnungsfaktor hingegen wird gegenüber den adiabatischen Verhältnissen kaum erhöht sein (Fig. 2). Über flachem Land und ohne Berücksichtigung der Bodenrauigkeit wird der Punkt höchster Konzentration theoretisch in ~ 20 km erreicht werden. Experimente in Jülich, Mühleberg und Karlsruhe (LV 7, 11—13) zeigen, dass dieser kritische Geländepunkt bei Berücksichtigung der Bodenrauigkeit und namentlich der Topographie wesentlich näher an die Quelle heranrückt: in Jülich liegt er je nach Intensität der Inversion zwischen 1,8 und 4 km von der Quelle entfernt, in Mühleberg sogar zwischen 1 und 1,5 km.

Fig. 2: Verdünnungsfaktoren für die bodennahe Luft bei bestimmten vertikalen Temperaturgradienten und Windgeschwindigkeiten, berechnet für einen 70 m hohen Kamin im unteren Aaretal.

- berechnet nach Sutton (LV 10); ohne Berücksichtigung der Bodenrauigkeit.
- - - - - berechnet auf Grund der Untersuchungen in der KFA KÜlich; mit Berücksichtigung der Bodenrauigkeit.

NB. Ein Verdünnungsfaktor von $1 \cdot 10^{-6}$ sec/m³ bedeutet, dass eine Radioaktivitätskonzentration von $1 \cdot 10^{-6}$ Curie/m³ in der Luft gefunden wird, wenn 1 Curie/sec abgegeben worden ist.



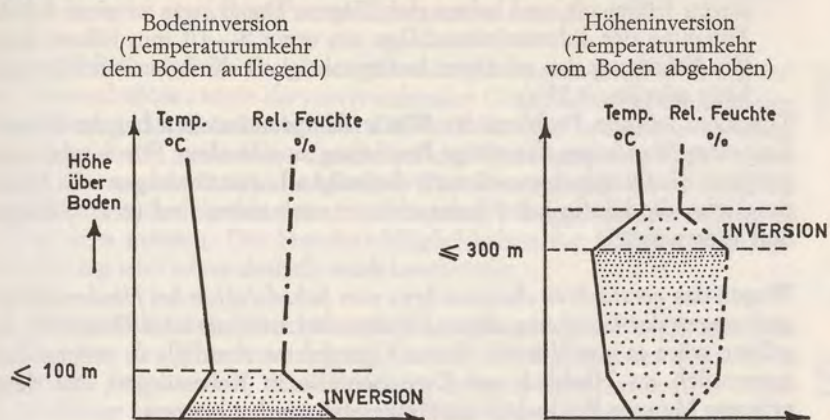
Inversionen bei
austauscharmen
Wetterlagen

Es soll noch betont werden, dass *Temperaturinversionen meistens mit austauscharmen Wetterlagen und sehr schwachen Winden* (bei starker Ausprägung der lokalen Windsysteme) zusammenfallen.

In Figur 3 sind zwei austauscharme, mit Inversionen verbundene Situationen dargestellt. Die erste stellt eine *Bodeninversion* dar, die von den Emissionen eines Kernkraftwerkes nur durchstossen werden kann, wenn die Abgabe der Schadstoffe in genügender Höhe erfolgt (Hochkamin). Ist dies nicht der Fall, breitet sich die Abluft in der Form aus, wie es oben beschrieben worden ist. Die zweite Darstellung rechts zeigt eine *tiefliegende Höheninversion*.

Obschon die Windgeschwindigkeit bei dieser Situation stärker anwachsen kann, und das für die Durchmischung zur Verfügung stehende Luftvolumen ansteigt, sind derartige Situationen ebenfalls ungünstig, da sie bei winterlichen Hochdrucklagen mit tiefem Sonnenstand und schwacher Einstrahlung oft mehrere Tage andauern können (LV 17).

Fig. 3: Zwei Inversionstypen, welche häufig zu Nebelbildung führen.



Noch *ungünstiger* werden die Verhältnisse, wenn *in der Bildungsphase der Inversion Bodennebel* auftritt, was in Würenlingen (unteres Aaretal) doch in ca. 15% aller lokalen Inversionen der Fall ist. In solchen Situationen bleiben die Winde schwach, und die Schadstoffe können sich nicht nach oben ausbreiten, was eine *Erhöhung der Schadstoffkonzentration in Bodennähe* zur Folge hat. Fälle solcher Art sind besonders in Tälern zu beachten, wo das vorhandene Luftvolumen auch seitlich eingeschränkt ist (LV 13, 14).

Bodennebel

Erhöhung
der Schadstoff-
konzentration

Wasserdampf und Niederschlag

Den *Wasserdampfemissionen kommt Bedeutung zu*, weil die heute gebauten KKW in der Schweiz mit *Nasskühltürmen* (Höhe bis 150 m) versehen sind. Die grossen Wasserdampfemengen, die hier abgegeben werden ($\sim 0,5 \text{ m}^3/\text{sec}$), könnten Auswirkungen auf das Klima ihrer unmittelbaren Umgebung haben.

Wasserdampf-
emission

Darüber sind bereits viele Berechnungen und Messungen durchgeführt worden, welche von der Arbeitsgruppe der SNG über «Thermische Auswirkungen von Kernkraftwerken» in ihrem Bericht verarbeitet worden sind (LV 8). Diese *Auswirkungen sind ausgesprochen wetterabhängig*. Sie beschränken sich auf das Gebiet im Bereich des *je nach Wetterlage und Jahreszeit $\sim 500 \text{ m}$ bis $\sim 5 \text{ km}$ langen Kühlturmschwadens*. Die wichtigsten Auswirkungen sind:

Auswirkungen
wetterabhängig

Länge des
Kühlturm-
schwadens

— *Zunahme der Bewölkung (Schwadenschatten) und eventuell des Nebels*, bzw. Abnahme der Sonnenscheindauer, namentlich wenn die Topographie die Luftströmungen in bevorzugte Richtungen zwingt (z. B. Täler).

- *Erhöhung der Niederschlagsbereitschaft*, d. h. Niederschlagsereignisse setzen früher ein und haben eine längere Dauer, was zu einer lokalen Zunahme der Jahresniederschläge um etwa 5—10 mm führen kann. Die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit dürfte vernachlässigbar klein sein (ca. 0,5%).

Trotzdem ist dem Problem der Wasserdampfemissionen bei der Beurteilung eines Standortes die nötige Beachtung zu schenken. Für windabwärts gelegene Siedlungsgebiete dürften diejenigen Luftströmungen von Bedeutung sein, die häufig mit Niederschlägen verbunden sind (z. B. Südwest- und Westwinde).

Niederschläge

Wegen des *verstärkten Auswaschens von Schadstoffen bei Niederschlägen* und wegen der Erhöhung dieses Effektes bei zunehmender Intensität derselben, wäre es von Vorteil, diesen Klimafaktor ebenfalls zu untersuchen, namentlich im Hinblick auf Zwischenfälle in Kernanlagen, bei denen grössere Mengen Radioaktivität freigesetzt werden können.

Dauer meteorologischer Messungen

meteorologische Messungen

Die Dauer der meteorologischen Messungen wird *je nach Standort verschieden und entsprechend der bereits vorhandenen Kenntnis des Klimas einer Region* anzusetzen sein. Dort, wo bereits Untersuchungen ähnlicher Art durchgeführt worden sind, könnte eine zweijährige Messreihe ausreichen, da es sich in solchen Fällen im wesentlichen darum handelt, die rein lokalen Klimafaktoren festzustellen und zu interpretieren. In weniger erforschten Klimaregionen dürften Messreihen *bis zu fünf Jahren* angemessen sein.

3.2 Hydrologie

Einleitende Bemerkungen

In der Beurteilung eventueller Standorte für KKW sind auch hydrologische Faktoren zu berücksichtigen. Dabei stehen folgende Probleme im Vordergrund:

Kühl-einrichtungen

Der Betrieb von thermischen Kraftwerken erfordert *Kühleinrichtungen*, wobei im wesentlichen die *Durchlaufkühlung mit Fluss- oder Seewasser* und die *Umlaufkühlung mit Nasskühltürmen* in Frage kommen (LV 20, 21). Im ersten Fall ist die erforderliche Kühlwassermenge proportional der ins Gewässer abgeführten Wärmemenge und umgekehrt proportional zur Kühlwassererwärmung; nach (LV 20) benötigt ein KKW von beispielsweise 800 MWe dafür die relativ hohe Kühlwassermenge von rund 40 m³/sec. Im zweiten Fall wird die Abwärme über den Kühlturm an die Atmosphäre abgegeben; dabei verdunstet ein kleiner Teil des zirkulieren-

den Kühlwassers, das laufend ergänzt werden muss, wozu im oben angeführten Beispiel etwa $0,6 \text{ m}^3/\text{sec}$ Kühlwasser notwendig sind.

Im ersten Fall wird das Gewässer *gütemässig* beansprucht. Die *Gewässerschutzvorschriften* setzen die entsprechenden *Grenzwerte* für die zulässige Aufwärmung des Gewässers (LV 22) und für eine eventuelle zulässige Belastung durch radioaktive Stoffe bei der Einleitung des Kühlwassers fest *). Daraus leiten sich die Mindest-Wassermengen ab, die an einem in Frage kommenden Standort auch in extremen Niederwasserperioden verfügbar sein müssen. Die Standort-Möglichkeiten für KKW mit Durchlaufkühlung sind schon deshalb stark beschränkt.

Grenzwerte
gemäss
Gewässerschutz-
vorschrift

Im zweiten Fall ist die *Beanspruchung mengenmässig* und stellt zunächst ein *Problem der Wasserversorgung* dar. Aus hydrologischer Sicht ist es interessant festzustellen, dass im obigen Beispiel die erforderliche Kühlwassermenge immerhin etwa dem mittleren Jahresabfluss eines etwa 30 km^2 grossen Gebietes im schweizerischen Mittelland entspricht. Schliesslich resultiert daraus eine Verminderung der Abflussmengen und eine entsprechende Erhöhung des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre.

Problem der
Wasser-
versorgung

Im Hinblick auf die bauliche Sicherheit einer KKW-Anlage stellt sich auch die Frage, welche Wahrscheinlichkeiten hydrologisch aussergewöhnlicher Hochwasserereignisse für einen Standort gelten. Sind diese *Hochwasserereignisse als bedrohliche Gefährdung der KKW-Anlagen und damit als Gefährdung der Bevölkerung* z. B. durch die Ausbreitung radioaktiver Pollutanten in den betroffenen, stromabwärtsliegenden Bereichen des Oberflächen-, Boden- und Grundwassers anzusehen? Ob eine KKW-Anlage an einem bestimmten Standort gegen ein seltenes Hochwasserereignis abgesichert werden kann (Projekthochwasser), ist ein rein bautechnisches bzw. finanzielles Problem und ist deshalb Sache der Bewilligungsvorschriften.

Gefährdung der
Bevölkerung
bei Hochwasser

Notwendig sind auch Hinweise auf das Problem der *Ausbreitung radioaktiver Stoffe* im Wasserkreislauf. Dies interessiert vor allem im *KKW-Störfall*. Die Frage nach einer eventuellen Anreicherung von radioaktiven Stoffen muss die Bodenchemie und Bodenphysik beantworten.

Ausbreitung
radioaktiver
Stoffe
im Störfall

Niederwasserverhältnisse und Verfügbarkeit von Flusswasser für Kühlzwecke und zur Aufnahme radioaktiver Abwässer

Aus den Gewässerschutz-Vorschriften und der Strahlenschutzverordnung leiten sich die oberen *Grenzwerte für die Belastbarkeit eines bestimmten Gewässers mit Abwärme und mit radioaktiven Abwässern* ab. Die Durch-

Grenzwerte der
Belastbarkeit

*) Artikel 107 der Strahlenschutzverordnung und zusätzlichen Vorschriften der Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen ASK.

mischung von Abwasser und Flusswasser steht als technisch lösbares Problem hier nicht zur Diskussion. Somit verbleibt als hydrologisches Standortkriterium die Abflussmenge pro Zeiteinheit an dem in Frage stehenden Flussquerschnitt.

Nach vollkommener Durchmischung von Flusswasser und KKW-Abwasser ist die Temperatur T_2 des Flusswassers und sein Gehalt an radioaktiven Stoffen R_2 eine Funktion folgender Grössen: Der Temperatur T_1 und der Radioaktivität R_1 des Flusswassers vor der Abwassereingabe, der Abflussmenge Q des Flusses an der Eingabestelle und der zugeführten Abwassermenge Q' mit der Temperatur T' und der Radioaktivität R' . Der Wärmeaustausch zwischen Wasseroberfläche und Atmosphäre darf im Hinblick auf die hier betrachtete kurze Flussstrecke vernachlässigt werden. Es gelten die folgenden einfachen Beziehungen:

$$T_2 = \frac{Q T_1 + Q' T'}{Q + Q'} \quad R_2 = \frac{Q R_1 + Q' R'}{Q + Q'}$$

Da T_2 und R_2 die durch *Vorschriften gesetzten oberen Grenzwerte* nicht überschreiten dürfen und Q' und T' Projektwerte des KKW sind, muss eine Mindest-Wasserführung Q -Grenze am betrachteten Flussquerschnitt gewährleistet sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass *durch eine temporäre Betriebseinschränkung des KKW kritische Niederwasserverhältnisse überbrückbar sind*. Nach (LV 23) ist bezüglich der Projektwerte Q' und T' der Störfall der KKW-Anlage in die Standort-Überlegungen mit einzubeziehen (siehe Bewilligungsverfahren für Atomanlagen).

Temporäre
Betriebs-
einschränkung
möglich

Verschiedene Angaben über die Minimalabflüsse der Fliessgewässer der Schweiz können aus den Jahrbüchern des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft entnommen werden (LV 24). In diesem Zusammenhang müssen statistische Untersuchungen über die *Wahrscheinlichkeit, dass an einem in Frage gestellten Flussquerschnitt der erforderliche Minimalabfluss nicht unterschritten wird*, einbezogen werden. Ein weiteres Kriterium ist die Dauer der Unterschreitung.

Minimalabfluss

künstliche
Eingriffe

Wegen der zunehmenden Nutzung unserer Gewässer ist zu beachten, dass in vielen Flussstrecken die *natürlichen Abflussverhältnisse durch künstliche Eingriffe verändert* sind. Das natürliche Niederwasser kann dabei nach oben oder nach unten «korrigiert» sein. Diese Eingriffe sind bei entsprechenden Niederwasserstudien zu berücksichtigen.

Bestimmende
Faktoren der
natürlichen
Niederwasser-
führung

Die *natürliche Niederwasserführung wird hauptsächlich durch Niederschlag, Lufttemperatur und Wärmebilanz der Bodenoberfläche bestimmt*. Da der Niederschlag in unseren Breiten im Mittel nur einen schwachen Jahresgang aufweist, sind ausgesprochene Minimalabflüsse als Folge längerer regenfreier Perioden an keine Jahreszeit gebunden. Im Winter sind bei negativen Temperaturen günstige Bedingungen für das Zustandekom-

men einer Niederwasserperiode gegeben. Hochgelegene Einzugsgebiete zeigen deshalb im Winter besonders langdauernde und extreme Niederwasserperioden. Flussgebiete mit einem genügend grossen Anteil an Hochgebirge oder Gletscheroberfläche zeigen im Sommer dagegen eine relativ ausgeglichene Wasserführung ohne extreme Minimalabflüsse (Schmelzwasserzufluss in regenarmen Schönwetterperioden).

Hochwasserfluten

Naturbedingte Hochwasserereignisse werden durch ergiebige Niederschläge von entsprechender Dauer oder durch Niederschläge in Kombination mit Schneeschmelze verursacht. Je nach Grösse des Einzugsgebietes sind für ein seltenes extremes Hochwasser räumlich begrenzte Starkniederschläge höchster Intensität (kleine Einzugsgebiete bis zu ca. 100 km²) oder länger anhaltende grossräumige und ergiebige Regenfälle (grosse Flussgebiete) die auslösende Ursache. Schneeschmelze oder Gletscherschmelze allein verursachen unter unseren klimatischen und topographischen Verhältnissen keine aussergewöhnlichen Hochwasser. In Gletschergebieten entstehen durch die Gletscherbewegung und durch Instabilitäten im glazialen Entwässerungssystem zusätzliche Unsicherheiten. Dabei sind sporadische plötzliche Ausbrüche von intraglazialen Wassertaschen und Gletscherseen möglich. Schliesslich sind in diesem Zusammenhang auch noch Eislawinen und schnelle Gletschervorstösse (glacier surges) als potentielle Gefahren an gletschernahen Standorten zu nennen (LV 25).

Naturbedingte
Hochwasser-
ereignisse

Hochwasser-Flutwellen als Folge eines Talsperrenbruchs verdienen besondere Aufmerksamkeit, auch wenn sie als sehr seltene Ereignisse gelten. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Ausbreitung derartiger Hochwasser-Flutwellen lässt sich mit *hydraulischen Modellversuchen*, aber auch mit genügender Genauigkeit mittels *mathematischer Verfahren erfassen* (LV 26). Da die Sicherheit von Talsperren kein hydrologisches Problem ist, wird auf diese Frage hier nicht näher eingegangen.

Flutwellen bei
Talsperrenbruch

Zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit von extremen Hochwasserereignissen als Folge extremer Niederschlagsereignisse existieren für die grossen Flüsse der Schweiz relativ lange Messreihen (z. B. Rhein/Basel seit 1808) (LV 27). Diese erlauben entsprechend gut gesicherte *statistische Analysen der Hochwasserhäufigkeiten*; allerdings ist im Laufe der Zeit durch wasserbauliche Massnahmen der Ablauf der Hochwasser beeinflusst worden, was bei entsprechenden Studien zu berücksichtigen ist. Bei kleinen und mittelgrossen Einzugsgebieten sind häufig gar keine oder nur kurze Messreihen vorhanden. Die Abschätzung der Grösse von seltenen extremen Hochwasserereignissen muss sich dann auf Resultate aus ähnlichen Gebieten oder auf empirische Formeln stützen. Solche Berechnungen sind entsprechend unsicher.

Statistische
Analysen der
Hochwasser-
häufigkeiten

Grösste bis 1969
beobachtete
Abflussmengen

Als wichtigste heute verfügbare *Grundlage für Hochwasserstudien* ist die *Publikation des Eidgenössischen Amtes für Strassen- und Flussbau* über die *grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen* von schweizerischen Gewässern zu nennen (LV 28). Darin werden Hochwasserfrequenzen sowie spezifische extreme Abflusswerte in Abhängigkeit von der Grösse des Einzugsgebietes graphisch dargestellt. Bei der Verwendung dieser durch statistische Extrapolation ermittelten Hochwasserfrequenzen für seltene Maximalereignisse ist u. a. zu bedenken: Über den genauen Zeitpunkt des Hochwasserereignisses sagen diese Angaben nichts aus, sondern nur über die mittlere Häufigkeit ihres Auftretens. Je extremer und damit weniger wahrscheinlich ein Hochwasser ist, desto ungenauer sind die geschätzten Werte. Trotz dieser Bedenken sind die genannten Unterlagen bei fachlich kompetenter Benützung von grösstem Wert bei der Beurteilung der Hochwassergefährdung eines Standortes.

Vermutlich
grösstes Hoch-
wasser (PMF)
und vermutlich
grösster Nieder-
schlag (PMP)

Wegen der hohen Sicherheit, die nicht nur beim Bau von KKW-Anlagen, sondern z. B. auch bei grossen Talsperren gefordert wird, interessiert in der Ingenieurhydrologie seit längerer Zeit das «*vermutlich grösste Hochwasser*» (probable maximum flood PMF) und der «*vermutlich grösste Niederschlag*» (probable maximum precipitation PMP). Diesen vor allem in Nordamerika entwickelten Methoden liegen physikalische Grenzwertbetrachtungen zugrunde (LV 29). Damit hofft man, unsicheren extremwertstatistischen Extrapolationen zu begegnen. Für unsere klimatischen Verhältnisse fehlen bis jetzt die nötigen spezifischen Untersuchungen über die physikalisch maximal möglichen Hochwasser.

Mathematische
Modelle

Für Gebiete ohne langjährige Abflussmessreihen werden neben empirischen Formeln in zunehmendem Masse auch *mathematische Modelle* herangezogen, *um zu Aussagen über Hochwasser zu gelangen*. Umfangreiche extremwertstatistische Auswertungen von Niederschlagsmessreihen (LV 30, 31) haben wesentliche Voraussetzungen geschaffen, um diese Formeln und Verfahren anwenden zu können. An der Verbesserung dieser Verfahren zur Berechnung des Hochwasser-Abflusses aus dem Niederschlag wird noch gearbeitet.

Bemerkungen zu hydrologischen Standortkriterien, welche sich auf den Störfall eines KKW mit unkontrollierter radioaktiver Kontaminierung der Umgebung beziehen

Bei diesem Fall interessieren hier die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe im Wasserkreislauf und das Ausmass der Kontamination. Prinzipiell ist auch zwischen Hochwassersituation und Mittelwasser-, bzw. Niederwasserführung zu unterscheiden.

Es darf angenommen werden, dass ein KKW-Gebäude auf die *höchstmögliche Hochwassergefährdung* ausgelegt wird, also auch einem Höchst-

hochwasser standhält. Das *Zusammentreffen eines seltenen, durch Niederschläge ausgelösten Hochwasserereignisses mit einem KKW-Störfall* ist somit als äusserst unwahrscheinlich anzusehen (voneinander unabhängige seltene Ereignisse). Anders verhält es sich mit der bei einem Talsperrenbruch ausgelösten Flutwelle; dabei ist zu beachten, dass die *Ereignisse «Talsperrenbruch» und «Störfall KKW» im Falle Erdbeben als gemeinsamer Ursache stochastisch abhängig* sein können. Für diesen Fall darf die Wahrscheinlichkeit für gleichzeitiges Auftreten beider Ereignisse nicht unterschätzt werden. Einem erkennbaren erhöhten Talsperrenbruch-Risiko (z. B. bei kriegesischen Vorgängen) kann durch vorbeugende Absenkung der Stauhaltung (Teilentleerung) begegnet werden.

Zusammentreffen von Hochwasser und Störfall ist unwahrscheinlich

Talsperrenbruch und Störfall bei Erdbeben denkbar

Für den Fall einer Überschwemmung grösserer Flächen bei gleichzeitigem KKW-Störfall ist es schwierig, aufgrund der verfügbaren Unterlagen über Art und Ausmass einer eventuellen radioaktiven Kontamination des Überschwemmungsgebietes etwas Fundiertes auszusagen.

Auch wenn man annimmt, dass der grösste Teil des austretenden radioaktiven Materials im Störfall in die Atmosphäre gelangt, interessiert im Rahmen dieses Kapitels die Frage nach der Infiltrationsgeschwindigkeit und der Aufenthaltsdauer des kontaminierten Wassers im Überschwemmungsgebiet. Die *Aufenthaltsdauer von Bodenwasser und Grundwasser bewegt sich im Skalenbereich von Wochen, Monaten und Jahren*. Die Infiltrationsgeschwindigkeiten können bis zu einigen Metern pro Stunde erreichen (k-Wert für Kies-Sand: 10^{-3} m/s). Weiter ist zu bemerken, dass humushaltige Böden als ausgezeichnete Filter für radioaktives Material angesehen werden (LV 32) und damit eine Verminderung der Kontaminationsgefahr für das Grundwasser anzeigen. Andererseits weisen bodenphysikalische Untersuchungen darauf hin, dass neben der kapillaren Versickerung den raschen Wasserbewegungen im Makroporensystem vermehrte Beachtung zu schenken ist. Dieselben Überlegungen gelten auch für Schadstoffe, welche mit dem Niederschlagswasser zum Boden und in den Wasserkreislauf gelangen.

Aufenthaltsdauer von Boden- und Grundwasser

Ebenfalls muss auf den Biozyklus des Wasserkreislaufs als eigenes Problem hingewiesen werden.

Im Zusammenhang mit der Ausbreitung der Kontamination in den Bereich des Grundwassers ist auch die Flussinfiltration zu berücksichtigen: *Flusswasser kann je nach Gefälle zwischen den Wasserspiegeln über grosse Strecken zum tiefer gelegenen Grundwasser hin strömen*. Bei mittleren und niederen Abflussverhältnissen wird sich die Kontamination eher auf die stromabwärts liegende eigentliche Flussstrecke beschränken. In jedem Einzelfall ist es aber notwendig, die Infiltrationsstrecke und den Bereich, in welchem das Grundwasser durch Flusswasser beeinträchtigt wird, durch entsprechende Studien sorgfältig zu erforschen (z. B. LV 33, 34).

Flussinfiltration

Besonders zu beachten ist die *Flussinfiltration entlang der Stauhaltung von Flüssen* (LV 34). Die Dauer der Kontamination im Fluss selbst wird im allgemeinen, sobald die KKW-Störung behoben ist, rasch abklingen. Dagegen sind in stromabwärts liegenden Seen ähnlich hohe Verweilzeiten wie im Grundwasser anzunehmen. Zahlreiche Untersuchungen über die Interaktion zwischen Grundwasser und Flusswasser sowie über die Verweilzeiten im Boden, im Grundwasser und in Seen sind notwendig, um alle hier aufkommenden Fragen befriedigend beantworten zu können. (Wichtige Literatur siehe LV 35—41.)

3.3 Geologie

wichtige
geologische
Aspekte

Bei der Evaluation von Kriterien zur Standortwahl eines möglichen KKW sind auch geologische Faktoren massgebend. *Für die Schweiz sind vor allem regionale und lokale geologische Aspekte von Bedeutung*, welche eng mit seismischen und hydrologischen Gegebenheiten gekoppelt sind. Bei der Wertung der verschiedenen Kriterien für die Standortwahl wird den Sicherheitsfaktoren — vor allen wirtschaftlichen Belangen — Priorität gegeben.

Die *Selektion der geologischen Faktoren* der KKW-Standortfrage kann vereinfacht wie folgt vorgenommen werden:

1. überregionale oder weltweite geologische Aspekte;
2. regionale Aspekte, die ganze Schweiz oder einzelne Regionen betreffen;
3. lokale Aspekte, d. h. der Standort und sein Nahbereich.

Überregionale oder weltweite geologische Aspekte

junge
Kettengebirge

Unter diesen Aspekten ist vor allem zu berücksichtigen, dass die Schweiz im *alpidischen Gebirgsgürtel, einem sehr jungen Kettengebirge*, und damit in einem Teil des mediterran-transasiatischen Erdbebengürtels liegt. In diesem Zusammenhang sind gewisse Verwerfungen und tektonische Linamente von überregionalen Ausmassen oder Versetzungsbeträgen zu beurteilen.

Regionalgeologische Aspekte

Aktive
Verwerfungen

Aktive Verwerfungen werden vielerorts als Ausschlusskriterium für den Standort eines KKW gewertet (bis zu einigen Kilometern beidseits der Bruchfläche). Eine Verwerfung wird als aktiv klassifiziert, wenn holozäne oder jungpleistozäne Bewegungen geologisch belegbar oder seismisch nachzuweisen sind. Die Bestimmung eines aktiven Bruches (Verwerfung) ist mit grossen Schwierigkeiten verbunden (LV 42). Eine subjektive Interpretation der geologischen Vorgänge ist oft nicht auszuschliessen und führt

zu Kontroversen. Nicht alle aktiven Verwerfungen manifestieren sich morphologisch an der Oberfläche; andere wiederum sind oft unter Vegetation oder jungen Ablagerungen verdeckt. Zudem gibt es Beben, die sich oberflächlich nicht abzeichnen. Auch sind aktive Brüche bekannt, an deren Bruchflächen Versetzungen nicht in Form von Erdbeben, sondern von aseismischem Kriechen auftreten.

Alle Anzeichen einer aktiven oder möglicherweise aktiven Verwerfung mahnen bei der geologischen Beurteilung eines möglichen KKW-Standesortes zu erhöhter Vorsicht.

Nebst neotektonischen, oft aktiven Verwerfungen existiert auch eine *grosse Zahl älterer, prae-pliozaener Brüche, Überschiebungen und tektonischer Lineamente*, die vorgängig einer KKW-Standortwahl auf Dislokationsmöglichkeiten und auf eventuelle Zusammenhänge mit Makro- oder Mikrobeben hin regional untersucht werden müssen.

Ältere Brüche

Verschiedene geologische Ursachen können zur Reaktivierung älterer Bruch- und Überschiebungssysteme führen. Mögliche Zusammenhänge reaktivierter Bewegungsflächen mit Erdbeben sind in der Schweiz nicht näher untersucht worden.

Im Mittelland sind vor allem quartäre Lockergesteine über Felsuntergrund — vergleichsweise mit Jura und Alpen — von ausgedehnter Verbreitung. In den meisten Fällen ist eine KKW-Fundation auf nichtzerrüttetem Felsuntergrund einer solchen auf Lockergesteinen vorzuziehen. Dies gilt insbesondere für die Molasse. Nur eingehende Voruntersuchungen erlauben jedoch eine Bewertung der Eignung der diversen lokalen Baugrundverhältnisse (geotechnische Parameter; Erdbebenbeanspruchung). Immerhin sollten in allen Regionen vermehrt *Standorte geprüft werden, die in eine impermeable Felsunterlage* ausserhalb von Grundwasserträgern und oberhalb der Linie extremer Hochwasserereignisse zu liegen kämen.

Quartäre
Lockergesteine
im Mittelland

Die Standortwahl eines KKW *in oder über einem grösseren Grundwasserträger*, der für Trinkwasser genutzt wird oder genutzt werden könnte, *ist möglichst zu vermeiden*. Noch kennt man die Langzeit-Auswirkungen und die Transportmechanismen kontaminierter radioaktiver Stoffe, die vor allem im Störfall in den Grundwasserträger gelangen können, nicht genügend (siehe Kap. 3.2., Hydrologie).

Standorte in
oder über
Grundwasser-
trägern

Bei der Evaluation regionalgeologischer Gegebenheiten muss deshalb die mögliche Verseuchung von Grundwasserleitern durch Radionuklide als einer der wichtigsten Faktoren berücksichtigt werden.

Die *Grundwasserverhältnisse der Lockergesteine* und eventuell des porös-permeablen Felsuntergrundes unterhalb geplanter KKW-Standorte *müssen*

deshalb vor der Standortwahl bekannt sein. Das betrifft insbesondere die Stratigraphie, Porosität und Permeabilität der Leiter, die Fließgeschwindigkeit, die Spiegelschwankungen, die Grundwasserstauer, die Art der Deckschicht und der Sohle des Grundwasserträgers, Einflüsse der Infiltration von und der Exfiltration in Oberflächengewässer, Migrations-, Retentions- und Sorptionscharakteristika der einzelnen Träger und benachbarter Lockergesteine sowie den Einfluss von Drainagesystemen im Störfall.

Ausreichende
Trinkwasser-
versorgung

Vorgängig einer Standortwahl muss sichergestellt werden, dass im Falle einer Grundwasserverseuchung durch Radionuklide eine *ausreichende Trinkwasserversorgung* aus einem nicht verseuchten Gebiet funktioniert.

Regionaltektonik

Für einen vorgesehenen Standort sind, nebst den bereits besprochenen Bruchsystemen, auch *regionaltektonische Belange wie Antiklinal- oder Synklinallage, grossräumige Einflüsse geologischer Verhältnisse auf Grundwasserbewegungen, Kluftwege und mögliche Karstphänomene auch unter Quartär- oder Alluvialbildungen zu beachten.* Für die regionale Beurteilung stehen in vielen Fällen zahlreiche Unterlagen zur Verfügung.

Einfluss
Massen-
dislokationen

Die Bewertung der Möglichkeit tektonischer (evtl. gravitativer) Bewegungen während der Lebensdauer eines KKW dürfte für die Standortfrage zu vernachlässigen sein (im Gegensatz zur Bedeutung dieser Frage bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, die hier nicht zur Diskussion steht). Für die Schweiz sind für die Standortwahl tektonische Belange regional relevant.

Ausserhalb seines Nahbereichs kann der Standort in Gebirgsregionen durch *Bergstürze, Rutschungen, Lawinen, Wasserausbrüche von Stauseen*, vor allem in Tallagen oberhalb des Standortes, eventuell auch sekundär ausgelöst durch *Flutwellen als Folge von Massendislokationen in einen Stausee oder durch ausbrechende Wassermassen hinter talsperrenden Massendislokationen* gefährdet werden. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit der Katastrophe in Bezug zur Lebensdauer eines KKW zu setzen.

Lokalgeologische Aspekte

Sie betreffen den Standort eines KKW und dessen Nahbereich, zu welchem je nach geologischen Verhältnissen ein Umkreis von mehreren km gehören kann.

Seismizität

Detaillierte *mikroseismische Messungen* über eine adäquate Zeitspanne hinweg sind vor jeder Standortwahl durchzuführen (siehe auch Kap. 3.4.).

Detailunter-
suchungen von
Verwerfungen

In enger Koppelung mit den seismischen Untersuchungen haben *detaillierte Auswertungen sämtlicher erfassbarer Verwerfungen im Nahbereich*

eines Standortes vorzuliegen. Insbesondere sind Bruchsysteme daraufhin zu untersuchen, ob es sich um aktive, möglicherweise aktive oder um reaktivierte ältere, d. h. um potentiell reaktivierbare oder um inaktive Brüche handelt. Die Verläufe von Bruch und Überschiebungsflächen in der Festgesteinsunterlage sind einzumessen. Durch quartäre oder alluviale Ablagerungen verdeckte Verwerfungen sind abzubohren oder aber seismisch zu eruieren.

Das Vorhandensein von *Verwerfungen, Flexuren oder Überschiebungsflächen unter jungen Ablagerungen* ist naturgemäss in zahlreichen Tälern der Schweiz anzutreffen, aber meist derart maskiert, dass Versetzungen in vielen Fällen nur schwer zu belegen, oft nur zu vermuten sind. Der Möglichkeit direkter Beziehungen zwischen Seismizität vor allem untief gelegener Erdbebenherde und geologischer Strukturmerkmale ist besondere Beachtung zu schenken.

maskierte
Verwerfungen

Deshalb ist vor der Wahl eines Standortes die Untersuchung von Klüftung, Karstphänomenen, Wasserführung und Stratigraphie der Felsunterlage sowie der sie überdeckenden Lockergesteine zu fordern.

Für die Gewährleistung einer *langfristigen Baugrundstabilität* müssen höchste Sicherheitsmargen gefordert werden. Die derzeitigen geologischen Untersuchungsmöglichkeiten, die jeweils in enger Zusammenarbeit mit dem Ingenieur abzusprechen sind, bieten genügend Gewähr für eine qualitativ und quantitativ ausreichende Beurteilung.

Baugrund-
stabilität

Den topographischen Merkmalen schweizerischer Regionen entsprechend sind auch *Standorte an oder in der Nähe von Hängen möglich*. Dies bedingt, dass die Hangstabilitäten gewährleistet sein müssen. Ungleich schwieriger als die Eruierung der Stabilitätsverhältnisse des Baugrundes sind jene der Hangstabilität im Nahbereich. Das gilt besonders im Falle der Gefährdung durch Massendislokationen im Alpengebiet, etwas weniger im Mittelland und in Jura-Regionen (insbesondere durch Bergstürze, Sackungen, Felsstürze und Rutschungen). Ereignisse dieser oder ähnlicher Art können durch verschiedene Ursachen ausgelöst, müssen jedoch auch im Hinblick auf seismische Ursachen untersucht werden (Setzungen, Bodenverflüssigungen, Grundbrüche nach Erdbeben).

Standorte an
oder in Nähe
von Hängen

Bei Anzeichen möglicher Massendislokationen grösseren Ausmasses sind *Bohrungen mit «Slope Indicators»* über hinreichende Zeiträume zu überprüfen. Standorte in der Nachbarschaft von Hanglagen mit potentieller Hanginstabilität sind zu meiden.

Zu den wichtigen Abklärungen gehören jene der *hydrogeologischen und hydrologischen Verhältnisse* (siehe Kapitel 3.2). Sie sind vor allem bei den regionalgeologischen Aspekten zu berücksichtigen und im Nahbereich des

Standortes durch detaillierte Untersuchungen im Hinblick auf einen Stör- und Katastrophenfall zu ergänzen. Das gilt speziell für eine mögliche Kontamination von Oberflächen- und Grundwasser durch radioaktive Stoffe.

Das Kavernen-KKW

Kavernen-KKW
und Lagerung
radioaktiver
Abfälle

Der Standort eines KKW unter Lockergesteinsüberdeckung oder in Felskavernen stellt geologisch einen Sonderfall dar. Bei derartigen Bauten ist gleichzeitig die Frage zu prüfen, ob ein Standort mit der Zwischenlagerung hochaktiver Abfälle kombiniert werden kann, was entsprechende geologische und felsmechanische Voruntersuchungen bedingt.

Für Kavernenwerke im Fels sind geologisch prinzipiell dieselben Voraussetzungen zu fordern wie für die Zwischenlagerung hochaktiver Abfälle, nämlich: homogener, nicht geklüfteter Fels hoher Standfestigkeit, gegenüber Wasser impermeables Gestein, hinreichende Distanz zu aktiven oder potentiell aktiven Brüchen, Lage wenn möglich ausserhalb der grundwasserführenden Gesteine, Zonen geringer Seismizität (was bei grosser Felsüberdeckung allerdings eine geringe Rolle spielt), Flanken- oder Antiklinalposition (Jura, Mittelland, z. T. Alpen), metamorphe Deckenkerne und Kristallinkörper in den Alpen.

Kavernenwerke in oder unter Lockergesteinsbedeckung sind — abgesehen von geotechnischen Problemen — geologisch wie Oberflächen-Standorte ohne Überdeckung zu beurteilen.

3.4 Seismik

Beschreibung des seismischen Risikos

Faktoren des
seismischen
Risikos

Einer UNESCO-Definition folgend (LV 43) kann das *seismische Risiko an einem Standort aus drei Faktoren multiplikativ zusammengesetzt werden:*

(Seismisches Risiko) = (seismische Gefährdung) · (Verwundbarkeit) · (mögliche Verluste). Demzufolge wird das seismische Risiko nicht nur durch die objektiv vorhandene Erdbebengefährdung bestimmt, sondern ebenso durch bauliche Massnahmen zur Absicherung gegen Erdbeben (Verminderung der Verwundbarkeit) und die möglichen Verluste durch Verwundete und Tote und materieller Güter.

Im folgenden Abschnitt soll lediglich auf den ersten Faktor, nämlich die objektiv vorhandene seismische Gefährdung, genauer eingegangen werden. In einem ausgewogenen Sicherheitskonzept müssen allerdings sämtliche das Risiko bestimmenden Faktoren angemessen in die Überlegung einbezogen werden.

Aufteilung der seismischen Gefährdung

Die an einem Standort *herrschende seismische Gefährdung kommt hauptsächlich in vier Bereichen zum Ausdruck:*

Häufigste
Ursache
seismischer
Gefährdung

1. Bodenerschütterung
2. Direkter Einfluss durch Bruch an der Erdoberfläche

Tabelle 2: Seismische Intensitätsskala MSK 1964 (LV 45)

Grad	Stärke	Personen	Wirkungen auf: Gebäude	Natur	Intensitätsskala Medvedev, Sponheuer und Karnik von 1964
I	unmerklich	nicht verspürt			
II	sehr leicht	vereinzelt verspürt			
III	leicht	vor allem von ruhenden Personen deutlich verspürt			
IV	mässig stark	in Häusern allgemein verspürt, aufweckend	Fenster klirren		
V	ziemlich stark	im Freien allgemein verspürt	Verputz an Häusern bröckelt ab, hängende Gegenstände pendeln, Verschieben von Bildern		
VI	stark	erschreckend	Kamine und Verputz beschädigt	vereinzelt Risse im feuchten Boden	
VII	sehr stark	viele flüchten ins Freie	mässige Schäden, vor allem an schlechten Gebäuden, Kamine fallen herunter	vereinzelt Erdbeben an steilen Abhängen	
VIII	zerstörend	allgemeiner Schrecken	viele alte Häuser erleiden Schäden, Rohrleitungsbrüche	Veränderungen in Quellen, Erdbeben an Strassendämmen	
IX	verwüstend	Panik	starke Schäden an schwachen Gebäuden, Schäden auch an gut gebauten Häusern, Zerbrechen von unter- irdischen Rohrleitungen	Bodenrisse, Bergstürze, viele Erdbeben	
X	vernichtend	allgemeine Panik	Backsteinbauten werden zerstört	Verbiegen von Eisenbahn- schienen, Abgleiten von Lockerböden an Hängen, Aufstau neuer Seen	
XI	Katastrophe		nur wenige Gebäude halten Stand, Rohrleitungen brechen	umfangreiche Verände- rungen des Erdbodens, Flutwelle	
XII	grosse Katastrophe		Hoch- und Tiefbauten werden total zerstört	tiefgreifende Umgestaltung der Erdoberfläche, Flutwellen	

3. Flutwellen

4. Sekundäre Einflüsse wie Lawinen, Rutschungen, Setzungen, Bodenverflüssigungen oder Felsstürze. Dazu zählen aber auch Feuer und Überflutung durch Schäden an Dämmen.

Bodenerschütterungen und dadurch hervorgerufene Schäden sind wohl das *am häufigsten beobachtete Phänomen in der Schweiz*. Dass aber auch die unter Punkt 4 genannten Vorgänge eine Rolle spielen können, hat 1963 das Überschwemmungsunglück am Vajont-Stausee in Nord-Italien deutlich gezeigt (LV 44).

Erdbeben-
Intensität als
Mass für die
Erschütterung

Als Mass für die Bodenerschütterung kann die seismische Intensität gewählt werden, die in Europa durch die MSK-Skala (1964) festgelegt ist. Eine gekürzte Form ist in Tabelle 2 wiedergegeben. Die Intensitäts-Skala hat den Vorteil, dass auch historische Erdbeben klassiert werden können, für die keine instrumentellen Aufzeichnungen vorliegen. Ein gewisses Problem liegt aber darin, die Intensität z. B. in Bodenbeschleunigung oder andere instrumentell messbare Grössen umzurechnen. Alle empirischen Zuordnungen dieser Art weisen eine gewisse Unsicherheit auf (LV 45).

Grundprinzipien für Kernkraftwerk-Standorte

Grundprinzipien
der Auslegung
von KKW
gegen Erdbeben

Die *Grundprinzipien für die Auslegung von KKW gegen seismische Einflüsse* werden von der «International Atomic Energy Agency» wie folgt definiert (LV 46):

- KKW in seismischen Zonen sollen derart ausgelegt und gebaut werden, dass sie kein grösseres Verstrahlungsrisiko darstellen als KKW in nicht-seismischen Zonen.
- In der Vorsorge gegen mögliche Auswirkungen ist absichtlich ein höherer Grad an Konservatismus (Sicherheit) zu wählen als bei anderen Einrichtungen und Bauten.

Für die Festlegung von Standorten für KKW ist es daher unbedingt erforderlich, jeweils die Erdbebengefährdung quantitativ zu ermitteln, damit entsprechende gezielte Massnahmen zur Verringerung des Risikos auf das akzeptable Niveau ergriffen werden können.

Grundlagen für die Ermittlung der Erdbebengefährdung

Seismologische,
geologische und
bodentechnische
Grundlagen

Zur quantitativen Bestimmung der seismischen Gefährdung eines Gebietes müssen eine ganze Reihe von Grundlagendaten vorhanden sein oder sorgfältig erarbeitet werden. Dazu gehören:

Seismologische Daten:

- Ein möglichst vollständiger Katalog der historischen Erdbeben in der Umgebung des Standortes mit Angaben über Ort und Stärke eines Bebens,

- Karten der Verbreitung von sogenannten makroseismischen Beobachtungen, wie z. B. den aufgetretenen Schäden bei den stärksten historischen Beben,
- instrumentelle Aufzeichnungen von Erdbeben an seismischen Stationen in der Umgebung, vorzugsweise sogenannte Beschleunigungs-Seismogramme.

Regionale und lokale geologische Daten (vergl. Kapitel 3.3):

- Kartierung und Einmessung regionaler geologischer Strukturen und des neotektonischen Deformationsbildes,
- Zusammenstellung sämtlicher, speziell der aktiven Brüche bzw. Bruchzonen möglichst mit Angabe der Verschiebungsvektoren. Besonders wichtig ist festzustellen, ob Brüche oder andere tektonische Strukturen in neuester Zeit (z. B. nach Bildung der Molasse) bewegt wurden,
- genaue Abklärung der lokalen Geologie in der unmittelbaren Umgebung des Standortes, insbesondere vorhandener lokaler Brüche und Deformationen am Standort,
- Beobachtungen möglicher Massendislokationen durch Erdbeben,
- Stabilitätsbedingungen, z. B. Aufwölbungen oder Setzungen,
- Kartierung des Grundwasserspiegels.

Bodentechnische Daten am Standort:

- Schichtung des Bodens, Mächtigkeit und Ausdehnung,
- Hangstabilität,
- elastische und andere physikalische Parameter des Untergrundes aus Labortests,
- Dämpfungsverhalten des Untergrundes gegen seismische Wellen.

Die Erdbebengefährdung in der Schweiz

Alle Methoden zur Ermittlung der Erdbebengefährdung an einem Standort beruhen auf der Verwendung von mehr oder minder bekannten Gesetzmässigkeiten und empirischen Zusammenhängen der seismologischen, geologischen und bodentechnischen Daten (LV 52). Im folgenden soll die sogenannte *probabilistische Methode* (LV 47) beschrieben werden, die für die Erarbeitung der *Erdbebenrisiko-Karten der Schweiz* angewendet wurde (LV 48).

Erdbeben-
gefährdung
in der CH:
Existierende
Karten

Ein wesentlicher Teil der seismologischen Daten für die Schweiz besteht in einem Katalog von etwa 2500 historischen Erdbeben, der einen Zeitraum von mehr als 1000 Jahren umfasst (LV 49).

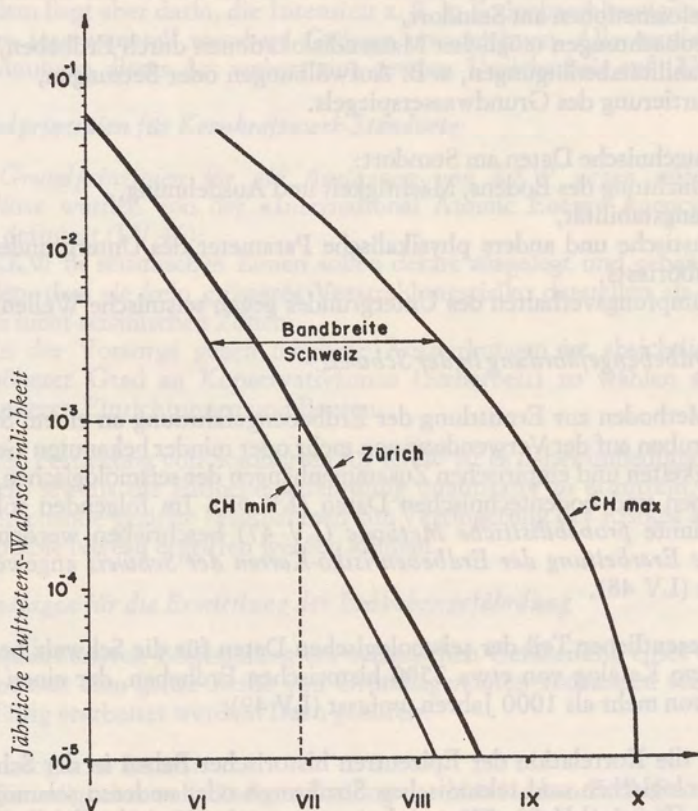
Durch die Korrelation der Epizentren historischer Beben in der Schweiz mit geologischen und tektonischen Strukturen oder anderen seismogenetischen Zonen (LV 50, 51) wurden sogenannte *seismische Quellen definiert*. Diese zeichnen sich gegenüber der Umgebung in erster Linie durch

seismische
Quellen

grössere Erdbebenaktivität aus. Die so festgelegten insgesamt 22 Quellen in der Schweiz und Umgebung werden durch verschiedene Kenngrössen charakterisiert. Dazu gehört die Anzahl und zeitliche Verteilung von Erdbeben und deren Stärke, weiterhin die überhaupt maximal mögliche Intensität oder Magnitude (das ist ein Mass für die seismische Energie) und die Abnahme der Intensität mit der Entfernung. Mit diesen Angaben lässt

Fig. 4: Beziehung der Standort-Intensität und der mittleren jährlichen Eintretenswahrscheinlichkeit für den willkürlich gewählten Standort Zürich. Entsprechende Kurven können für jeden anderen, beliebigen Standort ermittelt werden. Demnach muss z. B. in Zürich mit einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 0,001 pro Jahr — oder 30% pro 35 Jahre — eine Erdbebenintensität VII erwartet werden. Man kann umgekehrt auch sagen, dass ein Erdbeben mit Intensität VII mit 970%iger Wahrscheinlichkeit nicht auftritt. Die Kurve CHmin ist typisch für die am wenigsten gefährdeten Standorte im Mittelland und Jura, CHmax für die am meisten gefährdeten im Wallis.

Vergleich der
Erdbeben-
gefährdung an
verschiedenen
Standorten
in der Schweiz

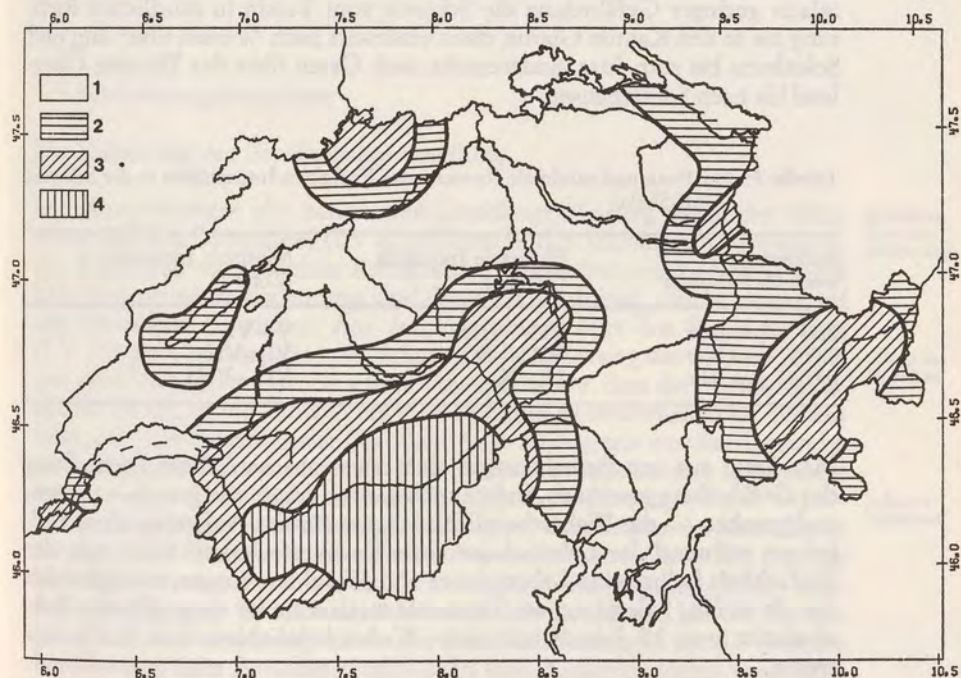


Intensität (MSK-Skala)

sich dann der Einfluss jeder seismischen Quelle auf einen Standort quantitativ berechnen. Die Einflüsse sämtlicher Quellen summieren sich schliesslich zur *eigentlichen Erdbebengefährdung an einem Standort* (LV 45).

Das Resultat der Berechnungen wird ausgedrückt durch den funktionalen Zusammenhang zwischen Intensität und zugehöriger Wahrscheinlichkeit des Auftretens. In Fig. 4 ist dies am Beispiel Zürich und je eines Standortes in der Schweiz mit der höchsten beziehungsweise der geringsten Gefährdung dargestellt. Man sieht daraus, dass kleine Beben mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit auftreten als grössere. Dies gilt generell für alle Standorte und entspricht einem fundamentalen empirischen Gesetz der Seismologie.

Fig. 5: Karte der Erdbebengefährdung in der Schweiz. Bei einer Auftretens-Wahrscheinlichkeit von 0,0001 pro Jahr (oder 0,30‰ in 35 Jahren) ist mit folgenden Intensitäten nach der MSK-Skala zu rechnen:
 Zone 1: VII½-VIII, Zone 2: VIII-VIII½,
 Zone 3: VIII½-IX, Zone 4: IX-IX½.



Wird die Berechnung nun für viele Standorte in der Schweiz immer in der gleichen Weise durchgeführt, so erhält man die in Fig. 5 wiedergegebene Karte. Diese Karte ist ein Beispiel für die zusammenhängende Darstellung der Gefährdung durch Erdbeben in der Schweiz.

Sicherheitsbeben

Im vorliegenden Fall wurde für die *Eintretens-Wahrscheinlichkeit der relativ kleine Wert 0,0001 pro Jahr gewählt*, weil diese Grösse bei der Auslegung von KKW in der Schweiz eine Rolle spielt. Die in der Karte wiedergegebenen Intensitäten entsprechen nämlich dem sogenannten «*Sicherheitsbeben*», bei dessen Eintreten gefordert wird, dass alle kern-technisch relevanten Anlagen eines KKW sicher abgeschaltet werden können, ohne dass nennenswerte Radioaktivität nach aussen entweicht.

Zonen mit
verschiedener
Erdbeben-
gefährdung
in der CH

Tabelle 3 gibt die maximalen und minimalen (berechneten) Erdbeben-intensitäten in der Schweiz für verschiedene Auftretens-Wahrscheinlichkeiten wieder. Der Maximalwert liegt dabei immer im Oberwallis, der Minimalwert im Jura und Mittelland. Die in der Karte (Fig. 5) sichtbare Einteilung in verschiedene Zonen konstanter Abstufung und deren geographische Lage bleibt für alle Wahrscheinlichkeiten gleich. Die Gebiete relativ starker Gefährdung liegen demnach im Wallis, in der Zentralschweiz, im Berner Oberland, im Engadin, im St. Galler Rheintal, in der Region Basel und südlich von Genf. Demgegenüber durchquert die Zone relativ geringer Gefährdung die Schweiz vom Tessin in nördlicher Richtung bis in den Kanton Glarus, dann einerseits nach Westen über Zug und Solothurn bis zum Jura, andererseits nach Osten über das Zürcher Oberland bis nach Schaffhausen.

Tabelle 3: Maximale und minimale (berechnete) Erdbeben-Intensitäten in der Schweiz (MSK-Skala)

Auftretens- wahrscheinlichkeit	Maximale Intensität (Zone 4)	Minimale Intensität (Zone 1)
0,01 pro Jahr	VII—VIII	V—VI
0,001 pro Jahr	VIII—IX	VI—VII
0,0001 pro Jahr	IX—X	VII—VIII

Man kann aus den Berechnungen eine etwas anschaulichere Darstellung der Gefährdung gewinnen, indem man danach fragt, wie gross — prozentual gesehen — die Wahrscheinlichkeit wäre für das Auftreten eines Erdbebens während der Lebensdauer eines Kernkraftwerkes. Setzt man der Einfachheit halber eine Lebensdauer von 35 Jahren voraus, so ergibt sich für die in Fig. 5 dargestellten Intensitäten, dass sie im vorgegebenen Zeitabschnitt von 35 Jahren mit *einer Wahrscheinlichkeit von 0,3% auftreten*.

Zusammengefasst kann für KKW-Standorte in der Schweiz folgendes gesagt werden (LV 45):

Zusammenfassung der Resultate aus Untersuchungen für die Schweiz

1. Die *seismische Gefährdung* in der Schweiz ist je nach Region unterschiedlich hoch zu bewerten. In Fig. 5 werden vier Zonen mit abgestufter Gefährdung unterschieden.
2. Die *Intensität des Sicherheitsbebens* mit einer Eintretens-Wahrscheinlichkeit von 0,0001 pro Jahr, oder anders ausgedrückt 0,3‰ in 35 Jahren, ist je nach Zone zwischen VII—VIII und IX—X, wobei zwischen den Zonen jeweils eine Abstufung von einer halben Einheit besteht.
3. Das *stärkste Beben*, das im statistischen Mittel während der Lebenszeit eines Kraftwerkes erwartet werden muss, liegt um etwa 2 Intensitätsstufen unter den in der Karte angegebenen Intensitäten für das Sicherheitsbeben. Die Unterteilung der Zonen sowie deren geographische Lage bleibt gleich.
4. Die vom seismischen Standpunkt aus gesehen *günstigen Gebiete für Standorte* sind demnach in der Zone 1, d. h. im Mittelland und im Tessin. Demgegenüber liegen die *ungünstigen Standorte* vor allem im Wallis (Zone 4).

3.5 Bevölkerungsverteilung

Die Bedeutung der Bevölkerungsverteilung

Die *Auswirkungen der kollektiven Strahlengefährdung* sowie der Kühltürme auf das Ökosystem (LV 8) gehören zu den wichtigsten Problemen, mit denen man sich bei einer Kernkraftwerk-Standortwahl zu beschäftigen hat. Von primärer Bedeutung sind dabei die Einflüsse, welche direkt auf den Menschen einwirken. Aus der Verordnung über den Strahlenschutz (LV 53) geht hervor, dass der *Schutz der Bevölkerung das nächste Anliegen des Gesetzgebers* ist. So schreibt diese u. a. vor, dass die Abgabe radioaktiver Stoffe an die Umwelt auf ein Minimum zu beschränken ist. Daraus folgt, dass die Belastung der Bevölkerung so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar gehalten werden soll. Kernkraftwerke müssen also so errichtet werden, dass sie auch *bei ausserordentlichen Verhältnissen* (z. B. bei erhöhter Abgabe von radioaktiven Schadstoffen) *kein unannehmbares Risiko für die in der Umgebung lebenden Personen bedeuten*. Ob es sich nun um viele oder wenige Personen handelt, ist grundsätzlich unerheblich, denn jede Einzelperson ist schützenswert. Aus diesem Grunde hat der Gesetzgeber auf die Festsetzung maximaler Strahlenbelastungen für die Gesamtbevölkerung oder Bevölkerungsgruppen (sog. Kollektivdosen) verzichtet.

kollektive Strahlengefährdung

Schutz des Menschen

nukleare Sicherheit

Fig. 6: Karte der Bevölkerungsverteilung in der Schweiz im Jahre 1960. Verkleinerung der im Atlas der Schweiz publizierten Karte von E. Imhof (vgl. LV 55).



Legende:

kleine Punkte: 200 Einwohner

grosse Punkte: 1000 Einwohner

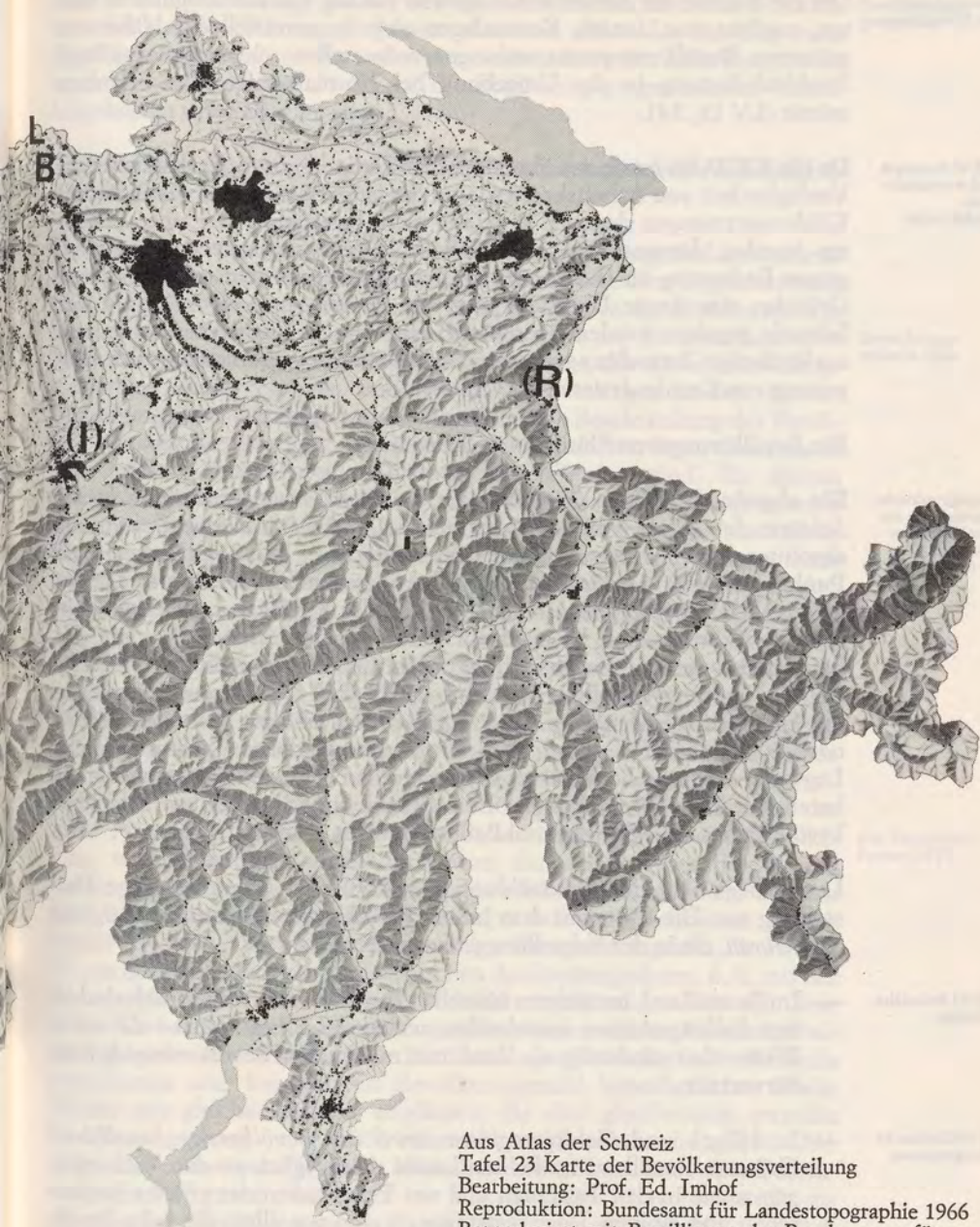
Quadrate: 5000 Einwohner

Flächen: Gemeinden mit über 50 000 Einwohnern

Buchstaben:

Betriebe, im Bau stehende oder geplante KKW

B: Beznau; G: Gösgen; Gr: Graben; I: Inwil; K: Kaiser-augst; L: Leibstadt; M: Mühleberg; R: Rüthi; V: Verbois



Aus Atlas der Schweiz
Tafel 23 Karte der Bevölkerungsverteilung
Bearbeitung: Prof. Ed. Imhof
Reproduktion: Bundesamt für Landestopographie 1966
Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für
Landestopographie vom 12. 2. 1980

Niedrighalten
der Einzeldosen

Um die Summe der Einzelbelastungen so niedrig wie nur möglich zu halten, trachtet man danach, Kernanlagen nicht in unmittelbarer Nähe von grösseren Bevölkerungsansammlungen aufzustellen, obwohl die geringe Strahlenbelastung in der Umgebung bei Normalbetrieb dies erlauben würde (LV 19, 54).

KKW-Standort
und wirtschaftliche
Verhältnisse

Da die KKW bis heute aus ökonomischen Gründen (u. a. Transportwege, Verfügbarkeit von Arbeitskräften) und der Gebundenheit an ausreichende Kühlwassermengen dennoch in relativ dicht besiedelten Regionen errichtet wurden, kommt dem Standortfaktor Bevölkerungsverteilung eine grosse Bedeutung zu (LV 1, 2). Im vorliegenden Bericht soll aus diesen Gründen eine kurze Übersicht über die Bevölkerungsverteilung in der Schweiz gegeben werden, an die sich ein Vergleich schweizerischer und ausländischer Betrachtungsweisen des Bevölkerungsproblems in der Umgebung von Kernkraftwerken anschliesst.

Die Bevölkerungsverteilung in der Schweiz

kartographische
Darstellung der
Bevölkerungs-
verteilung
in der Schweiz

Die abgedruckte Karte (Fig. 6) stellt die *Bevölkerungsverteilung in der Schweiz* dar. Diese wird definiert als die genaue räumliche Zuordnung absoluter Bevölkerungszahlen (Dauersiedler; vgl. LV 55). Die gezeigte Punktkarte (Fig. 6) dürfte die Bevölkerungsverhältnisse unseres Landes anschaulicher wiedergeben als eine solche der Bevölkerungsdichte allein (= Bevölkerungszahl, bezogen auf eine Einheitsfläche, z. B. km²). Es handelt sich um eine Verkleinerung der im Landesatlas publizierten Karte der Bevölkerungsverteilung im Jahre 1960 (LV 55). Zusätzlich wurden die *Standorte der heute im Betrieb stehenden, sich im Bau befindlichen oder geplanten KKW eingesetzt*. In Form verschiedener Signaturen (siehe Legende) kann die Bevölkerungszahl für jede beliebige Fläche angenähert herausgelesen werden, und der Betrachter kann sich rasch ein Bild über bevölkerungsarme Gebiete und Ballungszentren machen.

Leider liegt über die Volkszählung von 1970 noch keine derartige Darstellung vor. Die Karte aus dem Jahre 1960 zeigt dennoch *die wichtigsten Strukturen*, die in der Folge kurz genannt seien:

dicht besiedelte
Gebiete

— Im Raum Basel, im tieferen Mittelland und im Tessin lassen sich eindeutige *Ballungszentren* ausscheiden, wobei der Raum *Olten—Zürich—Winterthur* eindeutig als Zone mit maximalen Bevölkerungsdichten hervortritt.

Verhältnisse in
Bergregionen

— In Hügel- und Gebirgsregionen *wird die Bevölkerung kanalisiert*. Grössere Bevölkerungsdichten lassen sich folglich an den Talausgängen sowie in den Talsohlen und auf Talterrassen der grossen jurassischen und alpinen Täler feststellen, wobei vor allem die hohe Bevölkerungsdichte im Wallis auffällt.

Man kann sich die Frage stellen, wie weit man sich bei einer KKW-Standortwahl auf Bevölkerungsprognosen abstützen sollte. Da zur Zeit *vielle Bevölkerungprognosen überarbeitet werden müssen* (zu hohe Prognosenwerte), muss an dieser Stelle auf die Benützung prognostischer Verteilungskarten verzichtet werden.

Bevölkerungs-
prognosen

Die Bevölkerungsverteilung im Bereich schweizerischer und ausländischer Kernkraftwerke — ein Vergleich

Grundsätzliche Studien über die Bevölkerungsverteilung sind in den letzten Jahren in verschiedenen Ländern und internationalen Organisationen (IAEA, LV 56), namentlich aber in den USA und in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt worden. Die *besonders auf die amerikanischen Besiedlungsverhältnisse abgestimmten Richtlinien*, die aus solchen Untersuchungen hervorgegangen sind (LV 2, 57), verlangen in der näheren Umgebung eines Kernkraftwerkes eine derartige Beschränkung der Bevölkerung, dass die bei einem schwerwiegenden Unfall zu ihren Gunsten zu ergreifenden Massnahmen zeitgerecht durchführbar sind. Zu diesem Zweck unterscheiden die Richtlinien zwischen *einer inneren sogenannten Sperrzone* (exclusion area) und *einer äusseren schwach besiedelten Zone* (low population zone). Die Radien dieser beiden Gebiete hängen unter anderem von den technischen Sicherheitsvorkehrungen des Kernkraftwerkes ab und bezwecken, die Strahlendosen der Bevölkerung der Umgebung nach den schwersten zu erwartenden Unfällen in gegebenen Grenzen zu halten, wobei die gefährdete Bevölkerung in den beiden Zonen innerhalb von zwei Stunden bzw. in der Frist bis zum Durchgang der radioaktiven Wolke evakuiert werden soll. Bei den meisten bestehenden Standorten betragen die Radien der «Sperrzone» und der «schwach besiedelten Zone» im Maximum 0,4 Meilen (0,64 km), bzw. 2—3 Meilen (3,2 bis 4,8 km). Für die weitere Umgebung basieren die Richtlinien auf der Methode des «Site Population Factor» (SPF). Bei dieser Methode wird die Bevölkerung, welche in einem Kreisring wohnt, der sich in einer bestimmten radialen Entfernung von einem Kernkraftwerk befindet, mit einer Funktion gewichtet, die mit wachsendem Abstand vom Standort abnimmt. Dieser Faktor ist gleich $r^{-1.5}$, wobei r dem radialen Abstand entspricht, die Potenz $^{-1.5}$ aus der Analyse der meteorologischen Ausbreitungsdaten, d. h. aus der Distanzabhängigkeit des Diffusionsfaktors abgeleitet ist. Die auf diese Weise für bestimmte Kreisringe in zunehmendem radialen Abstand erhaltene, gewichtete und kumulative Bevölkerungszahl wird mit der ebenfalls gewichteten und kumulativen Bevölkerungszahl hypothetischer Kreisflächen mit gleichen Radien verglichen, die eine gleichmässig verteilte Bevölkerungsdichte von 1000 Einwohnern/Quadratmeile, bzw. 391 Einw./km² aufweisen (Schweiz. Mittelland: 382 Einw./km²). Die Berechnung des SPF für die Mehrzahl der amerikanischen Kernkraftwerke ergaben in den Abständen von 5, 20 und 40 Meilen einen Wert von $\leq 0,4$, was einer Bevölkerungsdichte von 400 Einwohnern/SQM, bzw. 156 Ein-

Betrachtungs-
weise in USA

Site Population
Factor (SPF)

Low Population
Site (LPS)

wohnern/km² entspricht. Aufgrund dieser Erfahrung hat man die gleichmässig verteilten kumulativen Bevölkerungszahlen dieser drei Kreisflächen, die dem SPF-Wert von 0,4 entsprechen, als *obere Grenze für die Definition des sogenannten «Low Population Site» (LPS)*, d. h. eines Standortes in einem «schwach bevölkerten Gebiet» gewählt.

nukleare
Sicherheit

Falls diese Bedingungen (LPS, exclusion area und low population zone) einzeln oder gesamthaft nicht erfüllt werden können, wird bei der Analyse des Standortes *mehr Gewicht auf die nukleare Sicherheit*, d. h. auf technische Vorrichtungen gelegt werden müssen, die sicherstellen sollen, dass die berechneten Folgen eines Auslegungsunfalles unterhalb der vorgeschriebenen Dosislimiten bleiben.

deutsche
Empfehlungen

In der *Bundesrepublik Deutschland und in der Schweiz*, die im Mittel wesentlich dichter bevölkert sind als die Vereinigten Staaten, werden *andere Bewertungskriterien für Kernkraftwerkstandorte angewendet*. Zur Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit wird das *Gewicht stärker auf die technischen Sicherheitsmassnahmen* gelegt.

Bevölkerungs-
dichteklassen

Zur Bewertung der jeweiligen Bevölkerungsverteilung in der Umgebung von Kernkraftwerken werden in *Deutschland z. B. drei Dichteklassen* unterschieden, wobei in der Klasse 1 die Gebiete geringster, in der Klasse 3 diejenigen höchster Bevölkerungsdichte eingereiht werden. Es wird ferner von einer «mittleren zonalen Besiedlungszahl» (MBZ) ausgegangen, die auf der mittleren Bevölkerungsdichte eines Raumes wie z. B. der Bundesrepublik Deutschland (248 Einwohnern/km²) basiert. Das Areal um den Standort wird in vier kreisringförmige Zonen aufgeteilt, deren tatsächliche Bevölkerungszahl (bezeichnet als zonale Besiedlungszahl = BZ) mit der genannten MBZ verglichen wird (vgl. Tabelle 4). Zusätzlich werden noch «mittlere sektorale Besiedlungszahlen» (MSBZ) verwendet, die es erlauben, die Auswirkungen eventuell vorhandener Verdichtungsräume (Grossstädte) zu beurteilen (vgl. Tabelle 5). Für die Bewertung ist dann der *Sektor mit der höchsten «sektoralen Besiedlungszahl» (SBZ)* massgebend, der, *falls er in einer Hauptwindrichtung liegt*, noch um eine Klasse schlechter zu bewerten ist.

Bewertung
auf Grund der
höchsten
sektoralen
Besiedlungszahl

Anwendungs-
möglichkeit
in der CH

Das in der Bundesrepublik empfohlene Modell kann aus naheliegenden Gründen *auch für die schweizerischen Verhältnisse verwendet werden*, wobei aber nicht die für das ganze Land berechnete «mittlere zonale Besiedlungszahl» als Grundlage der Berechnungen dienen darf, sondern *für jede natürliche Region die eigene «mittlere zonale Besiedlungszahl»* berücksichtigt werden muss.

regionale
Unterschiede

Für Tabelle 6 wurde aus diesen Gründen die «mittlere zonale Besiedlungszahl» des schweizerischen Mittellandes benützt (d. h. MBZ für eine Bevölkerungsdichte von 382 Einwohnern pro km²).

Tabelle 4: Bevölkerungskriterien zur Beurteilung eines Kernkraftwerkstandortes
(Vergleich zwischen der BRD und der Schweiz)

Zone (Kreise bzw. Kreise- ringe um den Standort)	MBZ bei Bevöl- kerungsdichte 248 E/km ² =	MBZ bei Bevöl- kerungsdichte 382 E/km ² =	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Nahbereich 0—2 km	3 000	4 800	$BZ \leq \frac{1}{3} MBZ$	$\frac{1}{3} MBZ < BZ \leq MBZ$	$MBZ < BZ$
Mittelbereich 2—5 km	16 000	25 200	$BZ \leq \frac{1}{2} MBZ$	$\frac{1}{2} MBZ < BZ \leq MBZ$	$MBZ < BZ$
Aussenbereich 5—10 km	60 000	90 000	$BZ \leq MBZ$	$MBZ < BZ \leq 2 MBZ$	$2 MBZ < BZ$
Fernbereich 10—20 km	230 000	360 000	$BZ \leq 1,5 MBZ$	$1,5 MBZ < BZ \leq 3 MBZ$	$3 MBZ < BZ$

BZ = zonale Besiedlungszahl

MBZ = mittlere zonale Besiedlungszahl (D: 248, CH-Mittelland: 382)

Tabelle 5: Klasseneinteilung eines Kernkraftwerkstandortes aufgrund der sektoralen
Besiedlungszahl des am dichtesten bevölkerten Sektors

Zone (Kreise um den Standort)	MSBZ bei Bevöl- kerungsdichte 248 E/km ² =	MSBZ bei Bevöl- kerungsdichte 382 E/km ² =	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Mittelbereich 2—5 km	1 300	2 100	$SBZ \leq MSBZ$	$MSBZ < SBZ \leq 3 MSBZ$	$3 MSBZ < SBZ$
Aussen- und Fernbereich 5—20 km	24 000	38 000	$SBZ \leq 2 MSBZ$	$2 MSBZ < SBZ \leq 4 MSBZ$	$4 MSBZ < SBZ$

SBZ = sektorale Besiedlungszahl

MSBZ = mittlere sektorale Besiedlungszahl ($\frac{MBZ}{12}$ bei 30° Sektoren)

Tabelle 6: Klasseneinteilung der bestehenden vier Kernkraftwerkstandorte im schweizerischen Mittelland und am Juranordfuss gemäss den deutschen Beurteilungskriterien

Standort	nach «zonaler Besiedlungszahl» ¹⁾				nach «sektoraler Besiedlungszahl»		
	0—2 km	2—5 km	5—10 km	10—20 km	2—5 km	5—20 km	Hauptwindsektor ²⁾
Beznau	2	2	1	1	2	1	NNE
Mühleberg	1	1	1	1	1	3	W + ENE
Gösgen	3	3	2	1	3	1	E
(Leibstadt)	2	2	1	1	2	1	W + E

¹⁾ vgl. Figur 7

²⁾ Sektor, in den der Wind weht

Bevölkerungs-
dichte für
verschiedene
Standorte der CH

Im Mittelland stehen bereits einige Kernanlagen in Betrieb. In Figur 7 wird die *reelle Bevölkerungsdichte in ganzen Kreisen in verschiedenen radialen Abständen von jedem einzelnen dieser Standorte* dargestellt. Zum Vergleich ist die mit r^2 bezeichnete Gerade eingezeichnet worden, welche die Verhältnisse wiedergibt im Falle einer gleichmässigen Verteilung der Bevölkerung um die Standorte und für eine Bevölkerungsdichte von 382 Einwohner/km², also für die «mittlere zonale Besiedlungszahl» des Mittellandes.

Beznau und
Mühleberg

Man erkennt aus dieser Darstellung, dass die Kernkraftwerke *Beznau und Mühleberg in relativ schwach besiedelten Gebieten* liegen und dass eine Zunahme der Bevölkerungsdichte im Falle des KKW Mühleberg nach 10 km stattfindet, wenn der radiale Abstand das Gebiet der Stadt Bern erreicht hat. Man sieht ferner, dass diesbezüglich der Standort *Gösgen weniger günstig liegt* (Nähe der Agglomerationen Olten und Aarau).

Gösgen

Standorte
in Deutschland
und den USA

Zum Vergleich sind in Fig. 8 einige *wichtige Standorte in Deutschland und in den Vereinigten Staaten in der gleichen Weise dargestellt* worden. Die Bevölkerungsverhältnisse um die Anlagen von Biblis in der Rheinebene bei Mannheim und von Neckarwestheim bei Stuttgart sind sehr ähnlich denjenigen um die schweizerischen Standorte. Das gleiche gilt für das Kraftwerk Indian Point im Staate New York. Der Standort von Three Mile Island in Pennsylvania liegt hingegen günstiger; er genügt sogar den amerikanischen Richtlinien des «LPS».

Darstellung in
Kreissektoren

Das Bild kann mit Vorteil durch die *Darstellung der Bevölkerungsverteilung in einzelnen Kreissektoren* ergänzt werden, wie es im erwähnten deutschen Bewertungssystem geschieht. In Figur 9 wird eine solche Unter-
suchung gezeigt. Es handelt sich dabei um die *Bevölkerungsverteilung um*

Fig. 7: Einwohnerzahlen (1970) in Funktion der Entfernung von Kernkraftwerken im schweizerischen Mittelland.

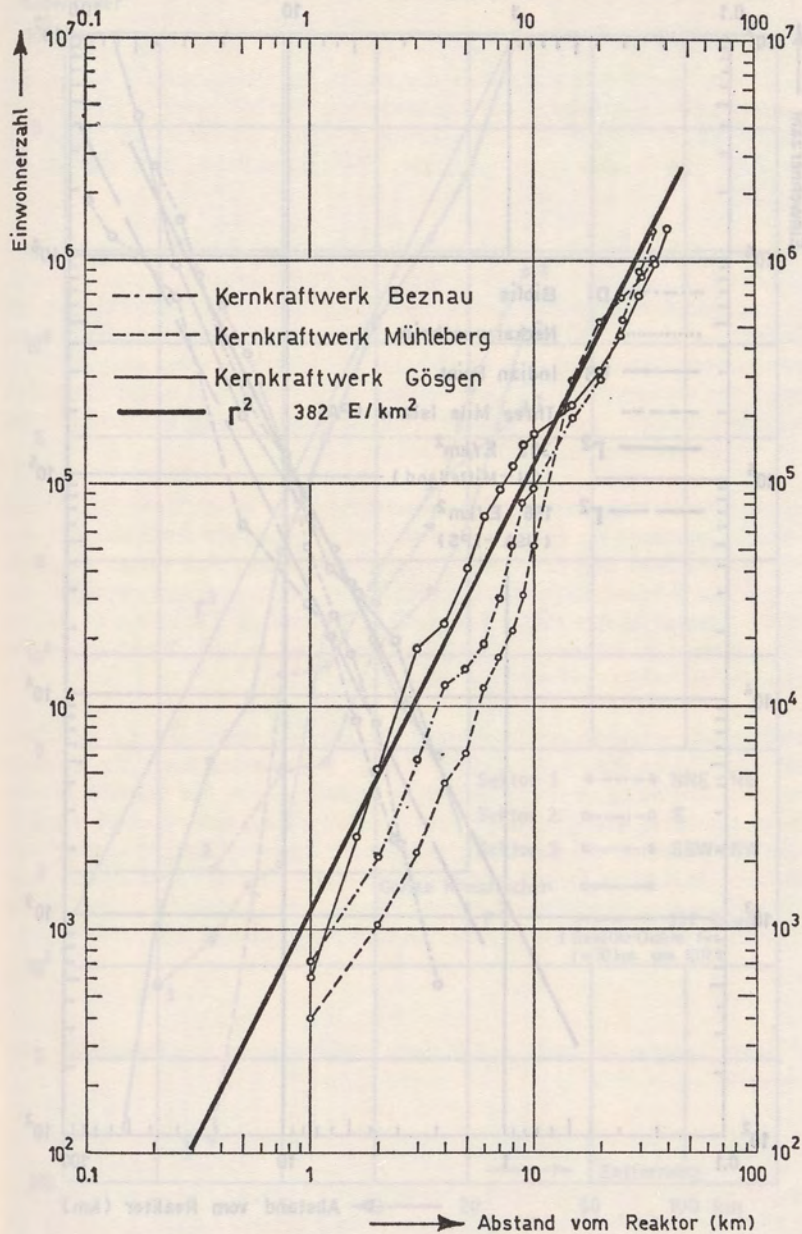


Fig. 8: Einwohnerzahlen in Funktion der Entfernung von KKW einiger Standorte in Deutschland und den USA.

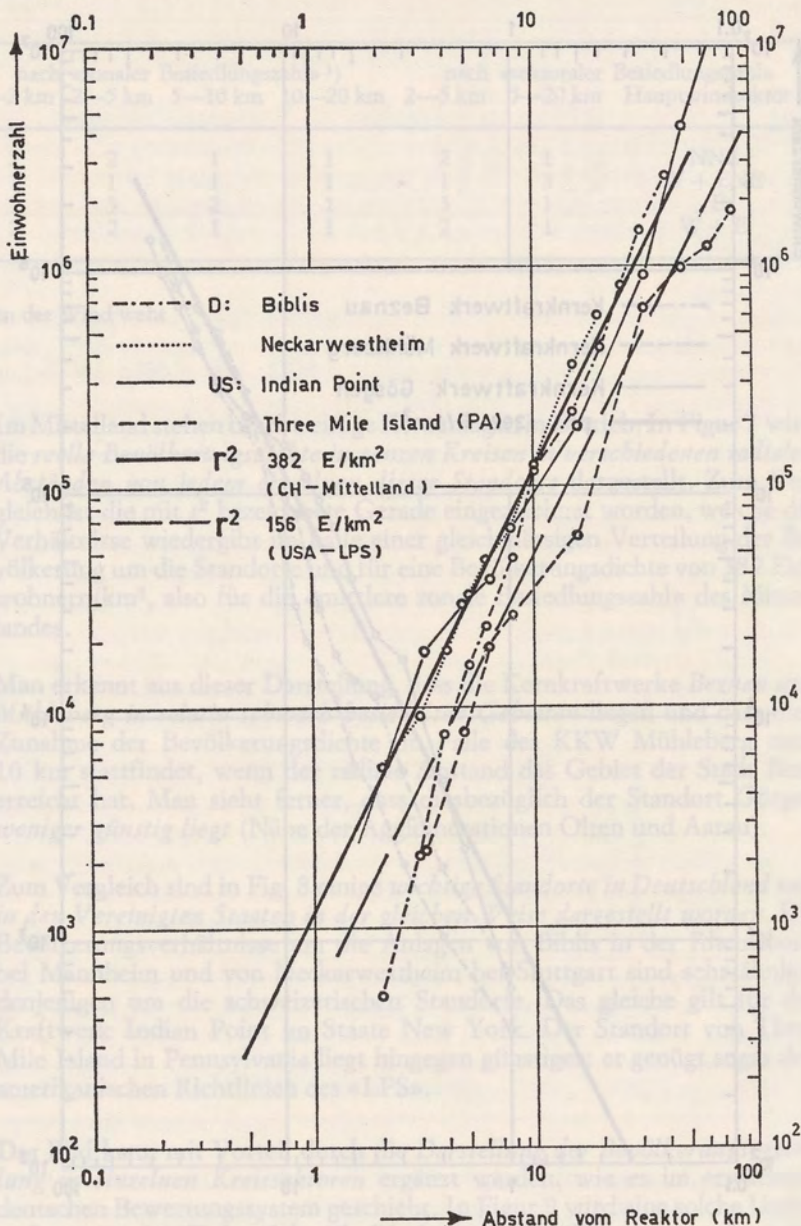
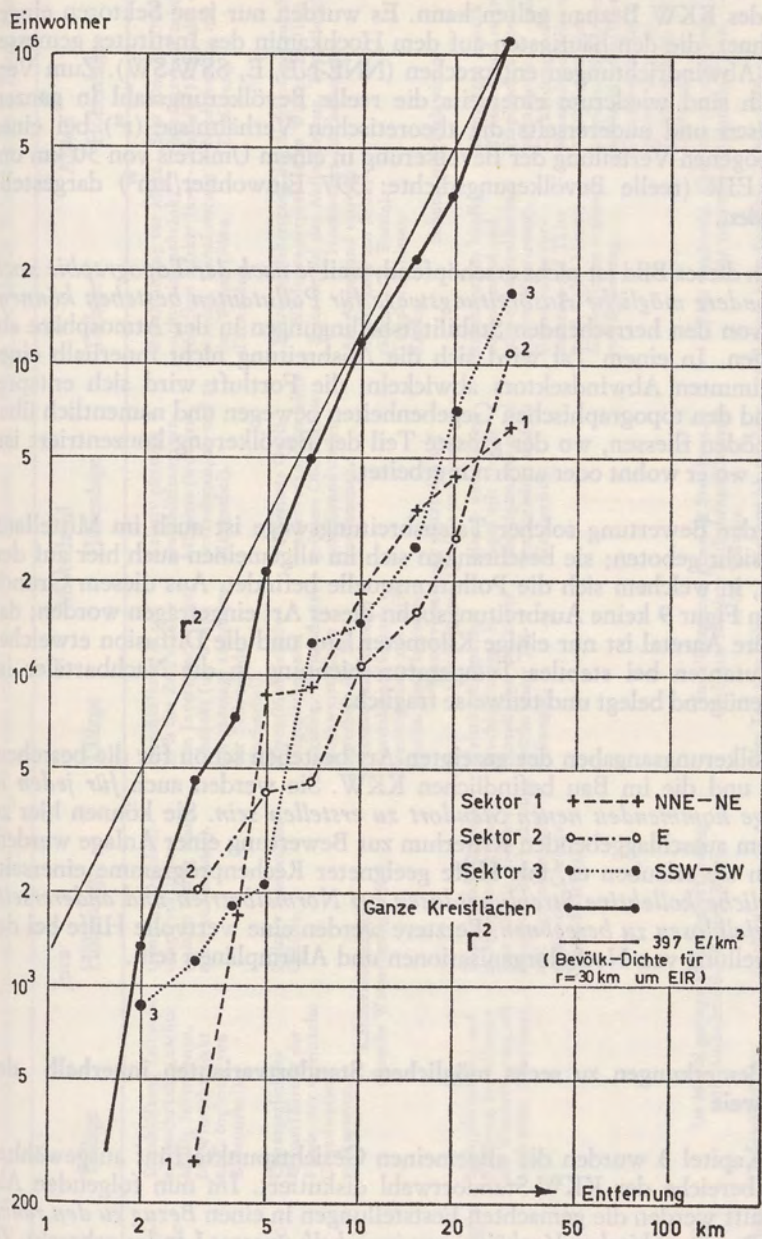


Fig. 9: Einwohnerzahlen (1970) in Funktion der Entfernung vom Hochkamin des Eidg. Institutes für Reaktorforschung (EIR).



das Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR) aus dem Jahre 1970 (LV 15), welche praktisch auch für den 1,5 km nördlich gelegenen Standort des KKW Beznau gelten kann. Es wurden nur jene Sektoren eingezeichnet, die den häufigsten auf dem Hochkamin des Institutes gemessenen Abwindrichtungen entsprechen (NNE-NE, E, SSW-SW). Zum Vergleich sind wiederum einerseits die reelle Bevölkerungszahl in ganzen Kreisen und andererseits die theoretischen Verhältnisse (r^2) bei einer homogenen Verteilung der Bevölkerung in einem Umkreis von 30 km um das EIR (reelle Bevölkerungsdichte: 397 Einwohner/km²) dargestellt worden.

Auch dieses Bild ist nicht erschöpfend, weil je nach der Topographie noch besondere mögliche Ausbreitungswege für Pollutanten bestehen können, die von den herrschenden Stabilitätsbedingungen in der Atmosphäre abhängen. In einem Tal wird sich die Ausbreitung nicht innerhalb eines bestimmten Abwindsektors abwickeln, die Fortluft wird sich entsprechend den topographischen Gegebenheiten bewegen und namentlich über Talböden fließen, wo der grösste Teil der Bevölkerung konzentriert ist, d. h. wo er wohnt oder auch nur arbeitet.

Bei der Bewertung solcher Talausbreitungswege ist auch im Mittelland Vorsicht geboten; sie beschränken sich im allgemeinen auch hier auf den Teil, in welchem sich die Pollutionsquelle befindet. Aus diesem Grunde ist in Figur 9 keine Ausbreitungsbahn dieser Art eingetragen worden; das untere Aaretal ist nur einige Kilometer lang und die Diffusion etwelcher Pollutanten bei stabiler Temperaturschichtung in die Nachbartäler ist ungenügend belegt und teilweise fraglich.

Bevölkerungsangaben der gezeigten Art bestehen schon für die bestehenden und die im Bau befindlichen KKW. Sie werden auch für jeden in Frage kommenden neuen Standort zu erstellen sein. Sie können hier zu einem ausschlaggebenden Kriterium zur Bewertung einer Anlage werden, denn sie erlauben es, mit Hilfe geeigneter Rechenprogramme einerseits jährliche kollektive Strahlungsdosen bei Normalbetrieb und andererseits Störfalldosen zu berechnen. Letztere werden eine wertvolle Hilfe bei der Erstellung von Notfallorganisationen und Alarmplänen sein.

4. Bemerkungen zu sechs möglichen Standortvarianten innerhalb der Schweiz

In Kapitel 3 wurden die allgemeinen Gesichtspunkte fünf ausgewählter Teilbereiche der KKW-Standortwahl diskutiert. Im nun folgenden Abschnitt werden die gemachten Feststellungen in einen Bezug zu den räumlich-topographischen Verhältnissen innerhalb unseres Landes gebracht. Zu

Tabelle 7: Geographisch-naturwissenschaftlicher Vergleich von sechs möglichen Räumen der Schweiz, die als KKW-Standorte in Frage kommen.

	Jura		Mittelland		Alpen	
	Tallage	Höhenlage	Tallage	Höhenlage	Tallage	Höhenlage
1. Meteorologie	Durchlüftung zeitweise eingeschränkt (nachts häufig Inversionen, im Winterhalbjahr z. T. begleitet von Bodennebel).	Günstige Durchlüftungsverhältnisse (relativ häufig Hangnebel und Schnee).	Durchlüftung in ca. 35% der Zeit infolge von Inversionen eingeschränkt (im Winter oft ganztags andauernder Boden- oder Hochnebel).	Relativ günstige Durchlüftungsverhältnisse (weniger Inversionen, ab und zu Hangnebel).	Durchlüftung vor allem nachts eingeschränkt (Einfluss starker Inversionen). Kanalisierung der Winde (Föhn, Talwinde).	Sehr günstige Durchlüftungsverhältnisse; häufig Hangnebel und Niederschläge mit Eisbildung.
2. Hydrologie	Unausgeglichenes Wasserführung der Flüsse, nur vereinzelte Grundwasser-vorkommen.	Relativ wasserarme Gebiete.	Alpenflüsse relativ ausgeglichen und ergiebig. Vermindertes Hochwasserrisiko unterhalb der Seen (Retentionswirkung). Ausgedehnte Grundwassergebiete mit Infiltration von Flusswasser.	Verbreitete Quellwasservorkommen ohne grössere Oberflächen- und Grundwasservorkommen.	Am Alpenrand extreme Hochwasser aus Seitentälern (z. B. Tessin). Talsperren bieten Risiken.	Extremer Jahresgang der Abflüsse mit anhaltender Niedrigwasserperiode im Winter, Einfluss der Stauseen auf das Abflussregime. Typische glaziale Hochwasser-Erscheinungen
3. Geologie	Karstphänomene und Klüftung beeinflussen die Wasserführung oft auch unter Alluvionen	Impermeable Gesteine in Hang- und Höhenlage günstig. Gebiete intensiver Bruchtektonik und Karstphänomene ungünstig. Geringe Wasserführung.	Weiträumig geringe Bruchbildungen. In Einzelfällen maskierte Brüche unter Tal-füllungen.	Hang- und Höhenlagen mit örtlich günstigem Baugrund am Standort und im Nahbereich.	Bruchsysteme häufig vorkommend und schwer kontrollierbar (unter Alluvionen). Grundwasservorkommen auf Täler beschränkt. Massendислоkationen regional von Bedeutung.	Hanglagen je nach Tektonik und stratigraphischen Voraussetzungen z. T. günstig. Gefährdung durch Massendислоkationen, Hochwasser und Lawinen. Kavernenwerke in kristallinen Gesteinen örtlich günstig (evtl. im Zusammenhang mit Lagerung).
4. Seismik	Im Mittel geringe Erdbebengefährdung mit Ausnahme der Region Basel.		Im allgemeinen günstige Standorte. Geringste mittlere Erdbebengefährdung in der Schweiz.		Eher ungünstig. Rhodener als am ungünstigsten. Eine Ausnahme bildet das Tessin.	
5. Bevölkerungsteilung	Unterschiedlich. In einzelnen Tälern erhöhte Bevölkerungsdichte.	Geringe Bevölkerungsdichte.	Zum Teil sehr hohe Bevölkerungsdichte (Ballungszentren).	Geringe bis mittlere Bevölkerungsdichte.	Relativ hohe Bevölkerungsdichte in den Tieflagen der Gross-täler; sonst allgemein gering.	Sehr geringe Bevölkerungsdichte.

diesem Zweck wird das Gebiet der Schweiz in die drei üblichen *Grossregionen Jura, Mittelland und Alpen* gegliedert, wobei zusätzlich eine *Zweiteilung in Talgebiete und höher gelegene Räume* vorgenommen wird. Die talnahen Hanggebiete müssen dabei in verschiedener Hinsicht (Auswirkung von Temperaturinversionen, Bevölkerungsverteilung usw.) noch zur Tallage gezählt werden. Auf eine spezielle Erwähnung der tieferen Regionen des Tessins wurde verzichtet, doch dürfte dieser Raum ähnliche Verhältnisse wie das schweizerische Mittelland aufweisen.

In Tabelle 7 werden die Eigenschaften der sechs Räume (als mögliche KKW-Standortvarianten) aus der Sicht der bereits genannten fünf Teilbereiche Meteorologie, Hydrologie, Geologie, Seismik und Bevölkerungsverteilung charakterisiert. Diese Darstellung gibt einige wesentliche Hinweise, lässt aber keine genaue Beurteilung eines bestimmten Standortes zu. Es ist deshalb unvermeidlich, dass vor einem Standortentscheid die genannten Faktoren einer *ganz sorgfältigen Detailuntersuchung* unterzogen werden.

Detail-
untersuchungen
notwendig

Schliesslich muss erwähnt werden, dass z. B. die Erdbebengefährdung eines Standortes nicht systematisch von der geographischen Lage abhängt. Entscheidend sind die Verteilung der Erdbebenherde in einem Gebiet sowie die tektonischen Gegebenheiten.

5. Schlussbemerkungen

Im letzten Kapitel werden wichtige Schlussfolgerungen, offene Probleme sowie davon abgeleitete Anregungen und Empfehlungen zusammengefasst und abschnittsweise für jeden der fünf oben behandelten Teilbereiche der KKW-Standortwahl dargestellt:

5.1 Meteorologie

Grundsätzlich lassen sich die in der Einleitung zu Kapitel 3.1 genannten Einflüsse geplanter KKW auf die Umwelt nur schwer voraussagen. Neben den Schwierigkeiten, die sich bei der Abschätzung klimatischer Veränderungen wie zum Beispiel der zusätzlichen thermischen Belastung ergeben (LV 8), bereitet auch die *Simulation meteorologischer Prozesse* (Berechnung der Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe, Abschätzung von Veränderungen im Windfeld usw.) noch immer Schwierigkeiten. Diese beruhen vor allem darauf, dass das für die Schweiz charakteristische und stark gegliederte Relief namentlich für längere Distanzen nur unzureichend in die mathematisch-physikalischen Modelle integriert werden kann.

Simulation
meteorologischer
Prozesse

Bei zukünftigen Studien ist *vermehrt die Mitarbeit von Fachleuten* zu suchen, die ein möglichst breites Spektrum der meteorologisch-klimatolo-

gischen Forschung abzudecken vermögen (Meteorologen, Klimatologen, Physiker, Mathematiker, Lufthygienespezialisten). Eine derartige Zusammenarbeit wird u. a. in der Arbeitsgruppe CLIMOD im Raum Basel angestrebt (LV 59).

5.2 Hydrologie

Auch in der Hydrologie muss auf verschiedene Wissenslücken hingewiesen werden, wie z. B. die *Unsicherheit bei der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von extremen Hochwasserereignissen* oder das *Problem der Verweildauer und der Ausbreitung von Schadstoffen* im Bodenwasser und Grundwasser. Auch drängen sich Fragen wie besonders jene über künftige Entwicklungen in der Wasserbewirtschaftung auf. Einige der angeführten Punkte haben weniger Gewicht als andere; soweit möglich, wurde dies zum Ausdruck gebracht.

Hochwasser-
ereignis

Verweildauer
Ausbreitung
von Schadstoffen

Die wissenschaftliche Hydrologie, in der Schweiz lange Zeit eher vernachlässigt, kann auch heute infolge beschränkter Mittel den gestiegenen Anforderungen nur schrittweise nachkommen.

5.3 Geologie

Auch in der geologischen Gesamtbeurteilung sind bei der Standortwahl zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen.

Deshalb wurde versucht, eine einfache geologische Bewertung regionaler und lokaler Kriterien für die Wahl möglicher KKW-Standorte anzuführen. Aus der Sicht des Geologen sind künftig *die Möglichkeiten von Standorten auf oder im Fels ausserhalb von Grundwasserträgern vermehrt zu beachten*. In Bezug auf die lokalgeologischen Gegebenheiten haben genaueste Untersuchungen *vor* der Standortwahl vorzuliegen.

Standorte
auf oder im Fels
ausserhalb von
Grundwasser-
trägern

Die geologische Abklärung darf — wie dies auch für andere Grossobjekte nationaler Bedeutung (z. B. grössere Alpentunnels) gefordert werden muss — nicht im Verantwortungsbereich eines Einzelnen oder einer einzigen Interessengruppe liegen, um nicht der Gefahr gewisser Einseitigkeit ausgesetzt zu sein. Wegen der starken interdisziplinären Überschneidung der mit Standortproblemen zusammenhängenden Fragen empfiehlt es sich, in jedem Einzelfall *einen Arbeitskreis von unabhängigen Fachleuten* — aus den Fachgebieten der Strukturgeologie, Baugrundgeologie, Hydrogeologie, Felsmechanik, Petrographie, Hydrologie, Seismologie und dem jeweiligen Kenner der Regionalgeologie — zu bilden.

Dieser könnte damit betraut werden, die Ergebnisse der geologischen und der damit zusammenhängenden Voruntersuchungen (Gutachten für die Gesuchsteller; Gutachten für die Sicherheits- und Bewilligungsbehörden) zu prüfen und die Beurteilung dem Bundesamt für Energiewirtschaft

weiterzuleiten und in verantwortbarem Mass um eine *Veröffentlichung der Ergebnisse* besorgt zu sein. So könnte eine genügend breite fachliche Beurteilung erreicht werden, ohne dass eine Änderung im bestehenden Begutachtungs- und Bewilligungsverfahren notwendig würde.

5.4 Seismik

Starkbeben-
messungen
in der Schweiz

Es gibt zu wenig *Messungen der Boden-Beschleunigung* im Epizentralgebiet von starken Erdbeben in der Schweiz. Die Gründe liegen darin, dass in der Schweiz nur relativ selten sehr starke Erdbeben auftreten und nur ganz wenige Beschleunigungs-Messgeräte existieren. Es sollte ein dichteres Netz von solchen Geräten in Gebieten aufgestellt werden, wo grössere Erdbeben zu erwarten sind. Daraus würde sich eine bessere Kenntnis der Charakteristik der starken Bodenbewegungen ableiten lassen. Im weiteren können *kurzzeitige räumliche und zeitliche Fluktuationen der seismischen Aktivität* in einem Gebiet bis jetzt nur unvollständig erfasst und erklärt werden. Um solche Veränderungen besser verfolgen zu können, müssen über eine längere Zeit hinweg sehr empfindliche Seismographen-Netze betrieben werden. Mit dem neuen Stationsnetz der Schweiz. Erdbeben-dienstes liegen bis jetzt lediglich Beobachtungen über einen Zeitraum von weniger als 10 Jahren vor (vor allem in Bezug auf das Verhalten von Mikro-Erdbeben). In diesem Zusammenhang sind ergänzende *Untersuchungen mit transportablen Stationen* unbedingt erforderlich.

regionale
Fluktuationen
der seismischen
Aktivität

5.5 Bevölkerungsverteilung

Vor allem aus ökonomischen Gründen liegen alle bis heute in der Schweiz gebauten KKW in den tiefelegenen, relativ dicht besiedelten Gebieten, welche auch aus der Sicht der meteorologischen Ausbreitungsbedingungen teilweise ungünstige Verhältnisse aufweisen. Deshalb muss das Problem der Bevölkerungsverteilung um die KKW mit grösster Sorgfalt studiert werden. Dabei muss vermehrt *der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung* Rechnung getragen werden. Sie dürfte speziell auch deshalb von Bedeutung werden, weil in Zukunft eine *vermehrte Nutzung der Abwärme* angestrebt wird, was wiederum einen wesentlichen Anziehungspunkt für Industrie und Wohnsiedlungen darstellt.

zukünftige
Bevölkerungs-
entwicklung
Abwärme-
nutzung

Schliesslich sei noch einmal auf die anfangs erwähnte Feststellung hingewiesen, wonach die Wahl eines KKW-Standortes nie aufgrund einer einseitigen Beurteilung entweder bloss ökonomischer oder bloss ökologischer Überlegungen getroffen werden darf. Es muss vielmehr eine Gesamtbeurteilung des in Figur 1 dargestellten Faktorengefüges angestrebt werden. Das muss noch vermehrt durch *interdisziplinäre Arbeitsgruppen* geschehen, die sich auf eine vorher erstellte, breit abgestützte Beurteilung der Eignung der verschiedenen natürlichen Raumeinheiten der Schweiz abstützen kann.

interdisziplinäre
Arbeitsgruppen

Literaturverzeichnis

- (1) International Atomic Energy Agency, 1975: Siting of nuclear facilities. Proceedings of a symposium jointly organ. by the IAEA and the ONEA and held in Vienna, 9.—13. Dec. 1974, Wien.
- (2) U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1975: Regulatory Guide 4. 7. General site suitability criteria for nuclear power stations, Washington.
- (3) Der Bundesminister für Bildung und Wissenschaft, 1972: Emissionsquellstärken von Kernkraftwerken. Ausschuss «Ausbreitungsberechnung für radioaktive Abluft», Schriftenreihe Kernforschung 6, Bonn.
- (4) Pasquill, F., 1974: Atmospheric Diffusion, London.
- (5) Ackermann, P., o. J.: Die meteorologischen Verhältnisse im schweizerischen Mittelland als Faktor zur Standortwahl und zur Überwachung von Reaktoren. Interner Bericht MZA, Payerne.
- (6) Arbeitsgruppe für die meteorologischen Auswirkungen der Kühltürme, 1972: Bericht zuhanden der Eidg. Kühlturmkommission über den heutigen Stand der Kenntnisse und die entwickelte Arbeitsmethode zur Abschätzung der meteorologischen Auswirkungen von Kühltürmen. Dienst für die Luftreinhaltung der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Payerne (SAUNA).
- (7) Vogt, K. J. und a., Sept. 1974: Untersuchungen zur Ausbreitung von Abluft-fahren in der Atmosphäre. Kernforschungsanlage Jülich, Zentralabteilung Strahlenschutz, Jül.-1143-ST.
- (8) Berichte der SNG zur Kernenergie, 1978: Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken. Beiheft zum Bulletin 1978/1 der SNG, Bern.
- (9) Holzworth, G. C., 1972: Mixing heights, wind speeds, and potential for urban air pollution throughout the contiguous United States. U. S. Environmental Protection Agency, Washington.
- (10) Sutton, O. G., 1953: Micrometeorology. A study of the lowest layers of the earth's atmosphere. Mac Graw Hill, New York.
- (11) Vogt, K. J., 1976: Ergebnisse Jülicher Ausbreitungsexperimente für 50 und 100 m Emmissionshöhe. Kernforschungsanlage Jülich, ZST 500967.
- (12) Schriber, G., 1978: Beiträge zur Bestimmung der Strahlenbelastung in der Umgebung von Kernkraftwerken. Diss. phil.-nat. Fakultät der Universität, Bern.
- (13) Nester, K. und Thomas, P., 1979: Ausbreitungsparameter. Jahresbericht 1978 der Abteilung Sicherheit, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-2775, 191—196.
- (14) Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt — Sektion für Luftreinhaltung, 1976: Kernkraftwerk Kaiseraugst, Meteorologie. Bericht MZA-SPA, Payerne.
- (15) Nagel, E., 1970: Standort und Umgebungsanalyse des EIR in Würenlingen, Interne Technische Mitteilungen, TM-SU-123.
- (16) Courvoisier, P. und Nagel, E., 1966: Die Temperaturinversionen im Raume des Eidg. Instituts für Reaktorforschung. Interne Technische Mitteilung, TM-SU-77.
- (17) Havlik, D., 1970: Inversionswetterlagen im südlichen Oberrheingebiet. Meteorologische Rundschau, 23, J 5, 129—134.
- (18) Wanner, H., 1979: Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage winterlicher Nebel im Querschnitt Jura-Alpen. Geographica Bernensia G 7, Bern.
- (19) Berichte der SNG zur Kernenergie, 1979: Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken bei Normalbetrieb, Bern.
- (20) Vischer, D., 1971: Die Kühlung von thermischen Kraftwerken — ein Überblick über die möglichen Lösungen. Gas — Wasser — Abwasser, 11, 1—7.
- (21) Vischer, D., 1971: Kühlwasserversorgung von Wärmekraftwerken. Österr. Z. f. Elektrizitätswirtschaft, 24, 8, 352—355.
- (22) Eidg. Departement des Innern, 1968: Gewässerschutztechnische Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Kühlwasserentnahme und -rückgabe bei konventionell- und nuklearthermischen Kraftwerken, Bern 19. 3. 68 (F. Baldinger); siehe auch Bericht der Eidg. Expertenkommission zur Ausarbeitung von Wärmelastplänen im Zusammenhang mit der Ableitung von Kühlwasser an Aare und Rhein, Februar 1972.

- (23) International Atomic Energy Agency, 1977: Code of practice on safety in nuclear power plant siting, Vienna.
- (24) Hydrographisches Jahrbuch der Schweiz: Herausgegeben vom Eidg. Amt für Wasserwirtschaft.
- (25) Röthlisberger, H., 1974: Möglichkeiten und Grenzen der Gletscherüberwachung. NZZ, Beilage Forschung und Technik, Nr. 196.
- (26) Chervet, A., Dallevés, P., 1970: Calcul de l'onde de submersion consécutive à la rupture d'un barrage. Schweiz. Bauzeitung, Heft 19.
- (27) Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), 1977: Das Rheingebiet.
- (28) Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau, 1974: Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern.
- (29) World Meteorological Organization, 1973: Manual for estimation of probable maximum precipitation. Operational Hydrology, Rep. No. 1, WMO-No. 332.
- (30) Hörler, A. und Rhein, H., 1961: Die Intensitäten der Starkregen in der Schweiz. Schweiz. Bauzeitung, 32.
- (31) Zeller, J., Geiger, H. und Röthlisberger, G., 1976, 1977, 1978: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. EAFV, Birmensdorf, Bd. 1, Bd. 2, Bd. 3.
- (32) Bulletin des Eidg. Gesundheitsamtes, 1969: 12. Bericht der Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität für das Jahr 1968 zuhnden des Bundesrates B, Nr. 4.
- (33) Jaeckli, H., 1967: Hydrogeologie. Atlas der Schweiz.
- (34) Jaeckli, H., 1977: Die Grundwasserverhältnisse im solothurnischen Wasseramt. Wasser — Energie — Luft, 5, 99—104.
- (35) Widmoser, P., 1974: Extremabflüsse aus vierzig kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweiz. Bauzeitung, Nr. 32.
- (36) Bruschin, J., et Esteve, R., 1973: Utilisation de l'analyse fréquentielle des crues pour la détermination de la crue de projet. Schweiz. Bauzeitung, Nr. 32/33.
- (37) Näf, F., 1977: Ein Vergleich von mathematischen Niederschlag — Abfluss — Modellen. Mitt. Nr. 26 der VAW, ETH Zürich.
- (38) Siegenthaler, U. und Schotterer, U., 1977: Hydrologische Anwendungen von Isotopenmessungen in der Schweiz. Gas — Wasser — Abwasser, 57, 7.
- (39) Verschiedene Autoren, 1978: Ökologische Untersuchungen der Kühlwasser-einleitung in die Aare, Beznau. Wasser — Energie — Luft, Heft 3/4, 43—81.
- (40) EAWAG / VAW / ETHZ, 1977: Fortbildungskurs über Einleitung von Abwasser in Seen. 24./25. 1. 77, ETH, Zürich.
- (41) Baldinger, F., 1970: Thermische Verunreinigungen der Gewässer und ihre Auswirkungen auf die Wasserversorgung. Gas — Wasser — Abwasser, 50, 11, 321—329.
- (42) Pavoni, N., 1977: Erdbeben im Gebiet der Schweiz. Ecl. geol. Helv., 70, 2, 351—370.
- (43) Fournier d'Albe, F. M., 1978: The UNESCO-Program on the Assessment and Mitigation of Earthquake Risk. Proc. Sympos. on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Czechosl. Akad. of Sciences, Liplice 1977.
- (44) Müller, St., 1970: Man Made Earthquakes: Ein Weg zum Verständnis natürlicher seismischer Aktivität. Geologische Rundschau, 59, 792—805.
- (45) Sägger, R., und Mayer-Rosa, D., 1978: Erdbebengefährdung in der Schweiz. Schweiz. Bauzeitung, 96. Jg., Heft 7, 107—123.
- (46) International Atomic Energy Agency, 1968: A seismic design and Testing of Nuclear Facilities. Technical Report Series 88, Wien.
- (47) Cornell, C. A., and Merz, H. A., 1974: Seismic Risk Analysis of Boston. Proc. ASCE Natl. Structural Engineering Meeting, Ohio, USA.
- (48) Mayer-Rosa, D., and Merz, H. A., 1976: Seismic Risk Maps of Switzerland. Description of the Probabilistic Method and Discussion of some Inputparameters. Proc. of the European Seismological Comission Symp. Luxembourg, Oct. 1975.

- (49) Katalog der historischen Erdbeben in der Schweiz, 1978: Schweiz. Erdbeben-
dienst an der ETH Zürich, Computer Datenbank.
- (50) Pavoni, N., und Mayer-Rosa, D., 1978: Seismotektonische Karte der Schweiz.
Eclogae Geologicae Helvetiae, 71, 2, 293—295.
- (51) Spicher, A., 1972: Tektonische Karte der Schweiz, 1 : 500 000. Herausg.:
Schweiz. Geologische Kommission.
- (52) Schneider, G., 1975: Erdbeben, Entstehung — Ausbreitung — Wirkung.
F. Enke, Stuttgart.
- (53) Schweizerischer Bundesrat, 1976: Verordnung über den Strahlenschutz.
- (54) Länderausschuss für Atomkernenergie, 1975: Bewertungsdaten für die Eigen-
schaften von Kernkraftwerkstandorten aus der Sicht von Reaktorsicherheit und
Strahlenschutz (Entwurf). Referat UA II 2—517 036/2, Bonn.
- (55) Atlas der Schweiz, 1966: Bevölkerungsverteilung 1960, Blatt 23. Eidg. Landes-
topographie, Wabern.
- (56) Schweizerischer Bundesrat, 1959: Bundesgesetz über die friedliche Verwendung
der Atomenergie und den Strahlenschutz SR 732.0.
- (57) Babocsay, L., 1976: Bevölkerungsdaten und Bewertungskriterien. Interner
Bericht KSA 20/11, Würenlingen.
- (58) Stock, 1977: Regionale Gesichtspunkte für oberirdische Kernkraftwerkstand-
orte in der Schweiz. IB 645-ASK-10, Zürich.
- (59) Eidg. Kommission Meteorologie des schweizerischen Gebietes Hochrhein/Ober-
rhein, 1978: Möglichkeiten regionaler Klimaveränderungen durch menschliche
Einwirkungen. 2. Zwischenbericht über das Projekt CLIMOD.

