

Unterirdische Kernkraftwerke

Autor(en): **Buclin, Jean-Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **105 (1987)**

Heft 40

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76720>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Unterirdische Kernkraftwerke

Von Jean-Paul Buclin

Seit dem Unfall von Tschernobyl wurden verschiedentlich Stimmen laut, welche sowohl in Parlamenten als auch in der Tagespresse die Entwicklung und den Bau von inhärent sicheren Reaktorsystemen verlangen. Bei solchen Überlegungen wird die unterirdische Bauweise gelegentlich als ein Mittel zur Erhöhung dieser inhärenten Sicherheit erwähnt. In Fachkreisen und in der Fachpresse wurden solche Wünsche bereits früher angebracht, ohne jedoch die unterirdische Bauweise besonders hervorzuheben.

Einleitung

Die Gründe, welche dazu führen könnten, unterirdisch zu bauen oder dies nur zu erwägen, sind zahlreich:

- vererbte Instinkte, Gewohnheit, Intuition, Unkenntnis oder Angst
- Vorsicht, mit der Überlegung, die gewünschte öffentliche Akzeptanz zu erhöhen
- ästhetische Gründe, im Sinne, dass die Umweltbeeinflussungen während des Baus, Betriebs und Abbruchs verkleinert würden
- Ersatz für den Mangel an geeignetem Bauland
- Schutz gegen natur- oder menschenbedingte äussere Einwirkungen, insbesondere gegen Kriegseinwirkungen
- Suche nach vermehrter inhärenter Sicherheit, insbesondere durch verbesserten Widerstand gegen innere Ereignisse
- kürzere Distanz zu stärker bewohnten Gebieten usw. . . .

Meistens werden mehrere der obigen Aspekte gleichzeitig als Begründung angeführt.

Gewohnheit, Instinkt, Unkenntnis oder Angst?

In der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts wurden zahlreiche hydraulische Kraftwerke und militärische Anlagen aus Gründen des Anlagenschutzes, für die erstgenannten gelegentlich auch aus Optimierungsgründen, unterirdisch gebaut.

Zu Beginn der Zeit der zivilen Kernkraftwerke, d. h. nach der ersten Konferenz der Vereinten Nationen «Atome für den Frieden» in Genf im Jahre 1955, entstand in Halden, Norwegen, das Projekt eines Versuchsreaktors.

Zu dieser Zeit, als die Vorkommnisse in Hiroshima und Nagasaki die Gemüter bewegten, war die potentielle Gefährdung durch Kernanlagen bereits erkannt, wenn auch daraus noch keine

Angstgefühle entstanden. Der Reaktor wurde am Rande einer Stadt mit 10 000 Einwohnern gebaut. Wenn die Anwohner auch aus Spass etwa Worte wie «Atom-Boum» gebrauchten, so waren sie doch nicht beunruhigt.

Gerade in Norwegen wurden bereits hydraulische Kraftwerke in Fels – wegen der günstigen Beschaffenheit des letzteren oft ohne Betonauskleidung – gebaut. Es schien normal, den Reaktor in einen steilen Felshügel auf dem Areal einer bestehenden grossen Papierfabrik einzugraben. Zu dieser Zeit bestanden weder Sicherheitskriterien noch Erfahrungen. Die Standortuntersuchungen, insbesondere jene der Geologie, wurden knappgehalten. Beim Bau eines Wasserkraftwerkes auf dem gegenüberliegenden linken Flussufer wurden gute Erfahrungen gemacht. Am rechten Ufer stiess man auf Gneis anstelle von gutem Granit. Wasser sickerte durch den Fels und sammelte sich am tiefsten Punkt an. Die Kaverne wurde mit Seitenwänden und einem Betongewölbe ausgekleidet, jedoch ohne Dichthaut. Es besteht ein freier Raum zwischen dem Gewölbe und dem Felsen, der aber nicht zugänglich ist. Seit einigen Jahren [67] wird der Zwischenraum mit Druckluft auf Überdruck gehalten. Die Dichtheit der Wände und des Gewölbes genügt, um durchsickern-des Wasser fernzuhalten. Das sich unten ansammelnde Felswasser wird aufgefangen und in Sammel- und Kontrolltanks gepumpt. Die Menge beträgt im Mittel ca. 1 m³/h.

Der Schleusenbereich wurde am Ende des Baues, in den Jahren 1958–59, durch Mörtelinjektionen zwischen Beton und Felsen wasserdicht und die elektrischen Kabel mittels Kunststoffpfropfen an den Durchführungen gasdicht gemacht. Dies bezweckte, bei einem Störfall mit Druckanstieg in der Kaverne ein Eindringen radioaktiver Gase und mitgerissener fester Stoffe in die neben und unterhalb des Zugangstollens angeordneten Betriebsräume zu verhindern.

Bei einem solchen Störfall würde heute der Betreiber versuchen, Druckausgleich im Freiraum zwischen Gewölbe

und Fels aufrechtzuerhalten. So könnte verhindert werden, dass die unvermeidlichen Leckagen in den Betonwänden das Felswasser kontaminieren würden. Andernfalls würden aber Beton und Fels für Feststoffe eine gewisse Filterwirkung zeigen. Diese Art von Containment nähert sich modernen Überlegungen (Frankreich, Schweden, 1980–85), welche einfache und robuste Filter zwischen der Sicherheitshülle und der Umgebung vorsehen [58]. Druckversuche in der Kaverne werden in Halden regelmässig durchgeführt.

Nach 25 Jahren treuer Dienste für die beteiligten Nationen, welche an der Weiterentwicklung des Siedewasserreaktors arbeiten (Schweden, BRD, Japan, USA), ist der Versuchsreaktor Halden noch heute in Betrieb.

Vorsicht und Akzeptanz

Alle schweizerischen Versuchsreaktorprojekte in den fünfziger Jahren, sowohl in der deutschen Schweiz (Thermostat-Sulzer mit vorgesehenem Standort unter dem Maschinenlaboratorium der ETH in Zürich, Suisatom in Villigen) als auch in der Westschweiz (ENUSA und Vorgänger, für welche als Standort Cossonay, dann Moudon, zuletzt aber Lucens gewählt wurde), sahen eine unterirdische Bauart vor. Hauptgrund war die Schwierigkeit, radioaktive Abgaben einzugrenzen, und die noch wenig bekannte Gefährdung, die von solchen Abgaben ausging.

Von den Dutzenden von Kernkraftwerken der Jahre 1950–70 wurden weltweit nur drei unterirdisch gebaut:

- Agesta, in Schweden, 1964
- Chooz A1, in Frankreich, 1967
- Lucens, Schweiz, 1967

Von den über 350 heute in Betrieb stehenden Kernkraftwerken auf der Welt läuft nur noch ein einziges unterirdisch, nämlich Chooz A1. Es ist keine eizige unterirdische Anlage im Bau, und es ist auch nicht bekannt, dass eine solche irgendwo geplant wäre.

Es war also reine Vorsicht, dass von den ersten europäischen Anlagen drei in einen Felshang hinein gebaut wurden. Man vermutete, dass die Containmentfunktion dadurch verbessert würde. Es ist sehr schwierig, nachzuweisen, inwiefern die Bevölkerung sich durch die unterirdische Bauweise weniger betroffen fühlte. War dies damals überhaupt eine ernste Sorge?

Agesta

Dieses Heizkraftwerk befindet sich südlich von Stockholm, in ca. 7 km Ent-

fernung von der Vorstadt Farsta. Es diente der Fernheizung dieser Vorstadt mit ca. 50 000 Einwohnern (60 MWth) und erzeugte mit Hilfe einer Gegen-druckturbine eine elektrische Leistung von ca. 10 MWe. Der Betrieb wurde 1974 eingestellt, da die Anlage als veraltet galt.

Zur Verhinderung von jeglichem Einsickern des Felswassers in die Kaverne wurden Betonwände und Gewölbe mit einer verschweissten Haut aus rostfreiem Stahl ausgekleidet. Verbleibende Spannungen in den wärmebeeinflussten Zonen, zusammen mit der korrosiven Einwirkung des sauren Felswassers (pH < 6), haben sowohl zu Lochfrass als auch zu Spannungsrisskorrosion geführt. Die Auskleidung war nur sehr beschränkt prüfbar und praktisch nicht reparaturfähig.

Chooz A1

Der Verfasser verfügt ausser Beschreibungen über keine eigenen Erfahrungen bezüglich des Sicherheitseinschlusses dieses Kraftwerkes. Bei heiklen Sachlagen muss allgemein vor veröffentlichten allgemeinen Daten gewarnt werden: Zum Beispiel hat sich im Falle Lucens gezeigt, dass Fachleute, welche wohl beim Konzept oder Bau dabei waren, aber spätere Versuche, Messungen und Feststellungen nicht miterlebt haben, in manchen Belangen Meinungen und Ideen vertraten, die oft überholt – wenn nicht sogar falsch – waren.

Lucens

Der nachfolgende Text behandelt fast ausschliesslich Aspekte, welche mit der unterirdischen Bauweise im Zusammenhang stehen, und zwar vorwiegend festgestellte Mängel. Er überspringt die grundsätzlichen Gedanken, welche damals zur Wahl des Konzeptes, zum Baubeschluss und schliesslich zur Inbetriebnahme geführt haben. Auch die sehr grossen Vorteile, welche die Schweiz gesamthaft aus dieser Erfahrung gezogen hat, werden in diesem Text nicht behandelt. Der Einsatz der ersten grossen Leistungskraftwerke in den Jahren 1969–73 hätte ohne die in Lucens gewonnenen Erkenntnisse kaum einen so günstigen Ablauf gezeigt.

Das Konzept und der Bau des Kavernen-Containments in Lucens wurden in der damaligen Fachliteratur reichlich beschrieben. In den Jahren 1962–63 erfolgte der Sandsteinaushub aller drei Kavernenräume gleichzeitig:

- Reaktorkaverne: zylindrisch,
H = 35 m, $\varnothing = 20$ m
- Maschinenkaverne: rechteckig,
 $L \times B \times H = 46 \times 10 \times 20$ m

- Stablagerkaverne: rechteckig,
 $L \times B \times H = 40 \times 7 \times 17$ m

Zu dieser Zeit waren tiefe Verankerungen in den Felsen noch nicht zur Reife entwickelt. In Lucens waren die Kavernen noch relativ klein und schmal. Die drei Kavernen lagen aber eng beieinander; die aus diesem Grund dünnen Zwischenwände wurden durch die Durchgänge von 10×10 m, welche im letzten Moment verkürzt wurden, noch geschwächt. Dadurch wurde der Zwischenpfeiler bis an die Grenze der Stabilität beansprucht. Starke Versteifungen mussten angebracht werden, wodurch das für die Ausrüstungen verbleibende Volumen weiter eingeschränkt wurde.

Die Abdichtung gegen das Eindringen von Felswasser wurde wie folgt verwirklicht:

- eine Drainageschicht aus Magerbeton, ca. 40 cm dick, auf den Felsen aufgebracht
- eine Lage Gunit, ca. 1 cm dick
- eine Dichthaut, bestehend aus drei sich überlappenden Al-Folien, jede in Bitumen eingelegt und gegen die äussere Gunitschicht warm aufgetragen
- eine innere Gunitschicht, ca. 1 cm dick
- eine Tragschicht aus armiertem Beton, ca. 50 cm dick.

Der natürliche Grundwasserpegel im Fels lag ungefähr in mittlerer Höhe der Reaktorkaverne. Das aus der vollgesaugten unteren Hälfte austretende Wasser sammelte sich am tiefsten Punkt jeder Aushubgrube an. In der am tiefsten im Berg liegenden Reaktorkaverne waren es ca. $5 \text{ m}^3/\text{Tag}$ und ungefähr die gleiche Menge in den übrigen zwei Kavernen, Verbindungs- und Zugangsstollen. Seit 1963 muss das Felswasser ständig abgepumpt werden. Der Wasseranfall schwankt wenig im Rhythmus der Jahreszeiten.

Wenn der Sandstein mit Luft in Kontakt kommt, zersetzt er sich. Deshalb muss nach dem Aushub die Oberfläche rasch zubetoniert werden. Die untere Hälfte der Drainageschicht wurde relativ früh durch das Zersetzungsprodukt des Felsens und durch aus dem Beton entstandenen Sand verstopft. Im Laufe der Jahre wurde auch die obere Hälfte der Drainageschicht mit Kalzitablagerungen verstopft. Heute ist dieses Drainagesystem praktisch vollständig versteinert [64,66].

Es wurden Metallrahmen mit Abmessungen von ca. 10×10 m an den Durchgängen zwischen den Kavernen eingesetzt. An diese wurde die Dichthaut mittels Gegenplatten angeschraubt. Undichte Stellen bei den Durchgängen

mussten nach dem Betonieren aufgebrochen und neu bearbeitet werden.

Der pH-Wert des Felswassers war an sich schon hoch, und er erhöhte sich noch beim Betonieren, um schliesslich Werte um 11 zu erreichen. Die Al-Dichthaut hätte sich beim Kontakt mit solchem Wasser schnell aufgelöst.

Es wurde Mörtel unter Druck rund um die Reaktorkaverne zwischen dem Tragbeton und der inneren Gunitschicht injiziert, um die Betonschrumpfung von ca. 1 mm auszugleichen, und dies besonders im Bereich des Durchganges zwischen Reaktor- und Maschinenkaverne. Ob diese Injektionen für die zu erreichende Dichtheit von Voroder Nachteil waren, bleibe dahingestellt.

Es wurden zwei ferngesteuerte Ventile eingebaut, sie sollten bei einem schweren Unfall den Überdruck aus der Reaktorkaverne in den Raum zwischen Fels und Drainagebeton ablassen. Man hoffte, dass damit die festen und löslichen Spaltprodukte wie Jod, Strontium, Cäsium... vom Fels aufgenommen und dort festgehalten würden.

Bei der Dichtheitsprüfung der fertigen, verschlossenen Kaverne musste man feststellen, dass die Dichtheitsanforderung nicht ganz erreicht wurde. Die Undichtheit war jedoch gering. Die Leckagefläche entsprach nur einem Loch von ca. 1 cm^2 bei einer totalen Wandfläche von 3000 m^2 .

Schon kurz nach Fertigstellung des Baus musste festgestellt werden, dass Felswasser an verschiedenen Stellen, insbesondere beim Durchgang zur Stablagerkaverne, durch die Dichthaut ins Innere der Reaktorkaverne durchsickerte. Diese Leckagen wurden aufgenommen und registriert. Viele konnten gefasst und durch das innere Drainagesystem zum inneren Sumpf geleitet werden. Eine dieser Leckagen mündete in den Wechselmaschinenraum der unteren Reaktorkammer (mit CO_2 unter atmosphärischem Druck gefüllt). Dieser Raum gehörte zum Kontrollstabskühlsystem und war in Verbindung mit dem Kühlpalt zwischen Druckrohren und Kalandriarohren des Reaktors. Die Feuchtigkeit sollte in diesem System den Wert von 1000 ppm nicht überschreiten. Es konnte bis November 1968 kein Wert unter etwa 30 000 ppm erreicht werden. Der spezifizierte Wert von 1000 ppm konnte erst erreicht werden, nachdem ein zusätzlicher Trockner eingebaut worden war.

Auch die Dichtheitsprüfung des Drainagesystems der Reaktorkaverne, hinter den zwei Abgabeventilen in den Felsen, zeigte eine höhere Leckrate, als bei den Sicherheitsstudien angenommen

wurde. Die Ursache wurde nicht festgestellt, und somit konnte die Situation auch nicht verbessert werden. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Dichtheit dieser Bauten weder dauernd überprüfbar noch reparierbar ist.

Das Verhalten des Containments während und nach dem Zwischenfall von Januar 1969 wurde im offiziellen Untersuchungsbericht, der im Jahre 1979 veröffentlicht wurde, beschrieben. Hier sei das Wesentlichste wiederholt:

□ Infolge eines Druckrohrbruches entlud sich der auf einer mittleren Temperatur von 300 °C befindliche Primärkreislauf innert ca. 4 Minuten. In der ersten halben Stunde wurde frisches CO₂ notnachsgepeist, und in dieser Zeit kühlte sich die Menge CO₂, welche in die Reaktorkaverne ausgetreten war, durch Kontakt mit der Oberfläche der Strukturen und Komponenten ab. Nachdem sich die Druckverhältnisse stabilisiert hatten, begann ein langsamer Druckanstieg: Die Luftzufuhr zu den Gebläsedichtungen und zur Steuerung von pneumatischen Ventilen überwog gegenüber kleinen Leckagen an einer elektrischen Durchführung und an zwei winzigen Entlastungsleitungen ($\varnothing < 10$ mm, in den Leitungsschemata nicht eingezeichnet und nicht mit Absperrventilen versehen, in die Abgasbehandlungsanlage führend) zu den Gebläsestillstandsichtungen.

□ In Anbetracht der geringen radiologischen Bedeutung des Störfalles wurden die Gasabgabeventile zum Fels nicht geöffnet, und somit wurden weder das Felswasser noch das Drainagesystem über den Richtwert für Trinkwasser hinaus kontaminiert. In den Wochen nach dem Zwischenfall konnten dort nur Spuren von Tritium und J131 nachgewiesen werden.

□ Drei Tage nach dem Störfalleintritt wurde der Inhalt der Reaktorkaverne über Absolutfilter und den Abluftkamin entlastet, ohne dass dies wegen des sich aufbauenden Überdruckes dringend gewesen wäre.

□ Die beim Störfall aufgetretenen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen (Druck und Temperatur des CO₂, Karbonatbildung) haben zu einer offensichtlichen und teilweise dauerhaften Verschliessung gewisser bisher festgestellter Leckagestellen geführt, darunter die Einsickerungsstelle in den Wechselmaschinenraum.

□ Bei einer erneuten Dichtheitsprüfung der Reaktorkaverne einen Monat nach dem Störfall musste festgestellt werden, dass sich die Dichtheit gegenüber früher verbessert hatte. Seit dem Jahre 1975 sind jedoch mehrere neue Sickerstellen, insbesondere an überhän-

genden Flächen, festgestellt worden. Grund dafür ist die Verstopfung der äusseren Drainage, welche zur Bildung von Wassersäulen, Wasserdruck und zur chemischen Zersetzung der Al-Dichtungshaut führte. Diesem Vorgang kann nichts entgegengesetzt werden. Als Verstopfungsgrad des Drainagesystems wurden [66] 99,9% gemessen, und die Stabilität der Kavernen wurde deshalb in Frage gestellt. Gegenmassnahmen sollten nicht allzulange hinausgezögert werden. Da bis heute keine vernünftige Wiederverwendungsmöglichkeit für die Kavernen gefunden werden konnte, insbesondere nicht für die Reaktorkaverne, würde die logische Gegenmassnahme im Zufüllen dieser Räumlichkeiten bestehen. Der von Innen entstehende Gegendruck würde zu einer Entlastung des Wasserdruckes führen.

Es ist also keine leichte Aufgabe, ein wasser- und gasdichtes unterirdisches Containment zu bauen und instandzuhalten. Man trifft dabei auf manche Schwierigkeiten, welchen man bei normalen oberirdischen Bauten nicht begegnet.

Schutz gegen Kriegseinwirkungen

Die Wanddicke eines gewöhnlichen Containments genügt zum Schutz von Kernkraftwerken gegen die Einwirkungen von leichten bis mittelschweren Waffen, also praktisch auch gegen Beschuss durch Saboteure, welche aus Distanz (ausserhalb der Absperrung) angreifen würden.

Berücksichtigt man die Zielgenauigkeit moderner schwerer Waffen, seien es Bombenabwürfe oder Raketenschüsse, so muss man gestehen, dass kein oberirdisch gebautes Kraftwerk auf die Dauer widerstehen würde. Dennoch wurde kein einziges Kernkraftwerk unterirdisch geplant.

Gegen Kernwaffeneinwirkung gibt es praktisch keine Schutzmöglichkeit. Die nötige Felsüberdeckung müsste grösser als 500 m sein. Aber schon die Zerstörung der Zugänge und der äusseren Anlagen würde genügen, um das gewünschte Ziel zu erreichen, nämlich die Vernichtung des Energieproduktionsapparates und des Energieverteilungssystems.

Schutz gegen weitere äussere Einwirkungen

Die am meisten einschränkenden naturbedingten äusseren Einwirkungen

sind die Geologie und das Wetter. Es mag stimmen, dass die seismischen Einflüsse mit der Tiefe der Gesteinsschicht abnehmen. Der Gewinn ist jedoch zu klein, um deswegen eine unterirdische Bauweise in einem tiefliegenden, kompakten Fels zu rechtfertigen. Die heutige Technik beherrscht die korrekte Einbettung eines Kernkraftwerkes auf Schotter in einem Gebiet hoher Seismizität ohne übermässige Mehrkosten. Spezielle technische Verfahren kommen neuerdings in Gebieten mit sehr hoher Seismizität zur Anwendung. Dort lässt man alle wichtigen Gebäude gegenüber einer festen Grundplatte als starrer Block in beide Richtungen gleiten. Eine solche Technik lässt sich bei der unterirdischen Bauweise nicht anwenden, weil die Beschränkung der Ausmasse der Hohlräume es nicht gestatten würde, den ganzen Block in einem einzigen Raum unterzubringen. Für die Sicherheit wichtige Anlagen müssten mittels zahlreicher Röhren und Leitungen, die in mehreren Verbindungsstellen untergebracht und alle gegen seismische Erschütterungen sehr empfindlich wären, miteinander verbunden werden.

In den Tropen sowie an Meeresufern können klimatische Einwirkungen wie Tornados, Wirbelstürme oder Tsunamis auftreten. Dagegen weiss man sich durch geeignete Bautechnik zu schützen, genauso wie man sich gegen andere menschenbedingte Einwirkungen nichtkriegerischer Art auch schützen kann, z. B. gegen Absturz von Grossflugzeugen oder Militärmaschinen bei Übungsflügen, gegen Überschwemmung infolge von Dammbriichen, gegen Explosionen bei nahem Transportunfall mit Sprengstoffen oder mit flüssigen Gasen usw. ... Es sei aber vermerkt, dass die Eintrittsfrequenz der meisten zivilisationsbedingten extremen Einwirkungen äusserst klein ist. In zahlreichen Ländern wird diese Eintrittsfrequenz so tief eingeschätzt, dass solche Einwirkungen aus der Liste der in Betracht zu ziehenden Störfälle ausgeschlossen werden. Der Mensch kann auch den Ablauf und Umfang der Gefahrenmomente, welche er selber erzeugt, beeinflussen, indem er zum Beispiel gefährliche Transporte in der Nähe eines Kernkraftwerkes unterlässt oder beschränkt oder indem er das Überfliegen gewisser Gebiete durch übende Militärflugzeuge verbietet.

Schutz gegen innere Einwirkungen

Sicherheitsfachleute suchten in der unterirdischen Bauweise eher einen ver-

besserten Schutz gegen innere Einwirkungen. Noch vor etwa zehn Jahren befürchtete man, dass ein nichtbeherrschter Bruch eines Reaktordruckgefässes oder einer Reaktordeckelschraube eine nicht vernachlässigbare Eintrittswahrscheinlichkeit zur Erzeugung eines internen Geschosses darstellte. Dann hätte eine Containmentwand, welche direkt auf den Felsen aufgestützt wäre, zur Lösung des Problems geführt, vorausgesetzt, dass sie durch den Aufprall nicht undicht würde.

In Wirklichkeit liesse sich eine solche Konstruktion ohne sehr aufwendige und komplizierte Methoden nicht verwirklichen. Eine dauerhafte Dichtheit kann nur erreicht werden, indem man jeden Kontakt mit Felswasser vermeidet und dies jederzeit überprüft, notfalls auch reparieren kann. Sieht man einen begehren Raum zwischen Containmentwand und Fels vor, so verliert man den Hauptvorteil der soliden, direkten Felsabstützung. Man müsste also ein Doppelcontainment mit einer sehr komplizierten Abstützung vorsehen, welche als Ganzes alle Anforderungen an Dichtheit, Prüfbarkeit, Reparaturfreudigkeit und Beanspruchung erfüllen müsste. Als erste Folgerung wird der erforderliche Aushub grösser, und die Spannweite des Gewölbes der Reaktorkaverne würde von etwa 50 m auf ca. 60 m ansteigen. Vor 10 Jahren gestattete die Technik kaum, ein Gewölbe mit 50 m Durchmesser unterirdisch herzustellen [14].

Zu dieser Zeit befürchtete man ferner, dass bei einem schlecht beherrschten Kühlmittelverluststörfall der geschmolzene Kern den Druckgefässboden durchdringen, im Sumpf sich mit Wasser vermischen und dabei eine Dampfexplosion verursachen könnte. In einem solchen Falle wäre eine solide, direkte Abstützung der Containmentwand gegen den Felsen erwünscht.

Man erkannte, abgestützt auf die Resultate von Grossversuchen, dass die Wahrscheinlichkeit solch extremer Abläufe für damalige Leichtwasserreaktoren vernachlässigbar klein war. Aus diesem Grunde verschwand auch das Interesse an der unterirdischen Bauweise. Dennoch zeigten probabilistische Risikostudien, welche auf der Basis der am MIT [11] und bei der NASA entwickelten Methoden für einzelne Anlagen durchgeführt wurden, zwar eine höhere Wahrscheinlichkeit eines teilweisen Kernschmelzens, aber auch geringere Konsequenzen, als vorher auf Grund äusserst pessimistischer Annahmen berechnet worden waren. Bei einer Wahrscheinlichkeit von etwa 0,01% pro Jahr und bei einer Gesamtzahl von etwa 300

Anlagen dieses Types musste man mit einem Störfall der Art des TMI-2-Unfalles etwa einmal alle 30 Jahre rechnen. Bei einem solchen Störfall darf man allerdings annehmen, dass das Containment mit grosser Wahrscheinlichkeit den ganzen Unfallablauf überstehen würde, und sollte es durch Überdruck leck werden, dann frühestens nach etwa einem Tag.

Die 1978-79, d. h. vor dem Unfall in Harrisburg, gezogenen Schlussfolgerungen [48, 49, 51] zeigten, dass es vorteilhafter wäre, heutige Containmentssysteme mit einem langsamen Druckabbausystem auszurüsten, um den Überdruck über einfache, robuste Filter abzulassen, als Kernkraftwerke kostspielig einzugraben, unter Inkaufnahme verschiedener Nachteile für die Sicherheit.

Die aus dem TMI-2-Unfall in Harrisburg (April 1979) gezogenen Lehren haben an diesen Überlegungen nichts geändert: Die Vor- und Nachteile der unterirdischen Bauweise wurden nicht anders bewertet; seither wurde nirgends an dieser Bauweise weitergearbeitet. Der Unfall in Tschernobyl dürfte in dieser Hinsicht auch keine neuen Gesichtspunkte bringen. Seither haben aber verschiedene Länder beschlossen, das Studium, den Bau und den Einsatz der obenerwähnten Druckabbausysteme mit einfachen Filtern zu beschleunigen, u. a. die Schweiz, Frankreich und die BRD.

In den letzten Jahren hat auch die Technik im Tiefbau grosse Fortschritte gemacht. Es wurden Projekte in der Grössenordnung eines Kernkraftwerkes studiert, welche manche der obenerwähnten Schwierigkeiten zu meistern behaupten und grosse Spannweiten im Fels vorsehen. Oberhalb der Gewölbezonen sollen zuerst Stollen gebaut werden, aus welchen ein Dach kegelförmig mittels Mörtelinspritzungen im Fels gebildet wird. Das Felswasser sollte diese dichte Decke nicht durchdringen, sondern an ihrem Rand gesammelt werden, so dass unter diesem verdichteten und trockenen Dach die Felskaverne ausgehoben werden kann. Eine solche Bauart würde natürlich sehr teuer zu stehen kommen, und wenn die Kosten/Nutzen-Vergleiche schon früher eindeutig zugunsten der traditionellen oberirdischen Bauweise neigten, dann erst recht bei bedeutend erhöhten Tiefbaukosten.

Es wurden auch Studien durchgeführt, welche darauf zielten, bei Standorten mit Schotterterrassen die nukleare Anlage in einer tiefen Grube zu bauen, welche am Schluss mit mehreren abgedichteten Schichten zugedeckt würde. Da eine solche Grube sehr tief wird, ist

bei Anwesenheit von Grundwasser, was normalerweise der Fall ist, mit grossen technischen Schwierigkeiten und hohen Kosten zu rechnen.

Probleme in dicht besiedelten Gebieten

Bei einem schweren Unfall mit teilweisem Kernschmelzen würde eine bedeutende Menge radioaktiver Edelgase in das Containment freigesetzt. Diese Edelgase können weder durch Filtern noch durch Absorption im Raume zwischen der Kavernenauskleidung und dem Felsen erheblich zurückgehalten werden. Bei einem Containmentleck würde ein Teil unweigerlich an die Umgebung abgegeben werden, und die entstehende Gaswolke würde die sich im Freien aufhaltenden Menschen bestrahlen. Eine einfache Hausmauer als Abschirmung ist bereits ein guter Schutz. Deshalb wird für einen solchen Fall eine rasche Alarmierung der nächsten Umgebung (bis ca. 4 km) vorgesehen. Der Schutzraum braucht nicht luftdicht zu sein, weil nur die Menge radioaktiver Gase, welche sich innerhalb dieses Raumes befindet, zur Bestrahlung beitragen kann. Die Gefährdung hängt also nicht von der Einatmung, sondern von der äusseren Dosis ab.

Glücklicherweise haben die meisten dieser Gase eine kurze Halbwertszeit. Nach weniger als zwei Tagen nimmt die Gefahr bereits stark ab. Wichtig ist also, dass das Containment während dieser zwei Tage dicht bleibt. Gerade diese Forderung lässt sich bei einem herkömmlichen, oberirdischen Containment besser erfüllen.

Vor- und Nachteile der unterirdischen Bauweise

Es soll nun versucht werden, die Vor- und Nachteile eines unterirdischen Baues aufzuzählen. In dieser Aufzählung soll kein Unterschied zwischen den verschiedenen denkbaren Arten [04,08 . . .] der unterirdischen Bauweise gemacht werden:

- vertikal in einem tiefen Schacht
- horizontal in einem Stollen
- in einem Hügelhang
- in einer überdeckten Grube

Vorteile

□ *Besserer Schutz gegen Kriegseinwirkungen*, vorausgesetzt dass die letzte (End-)Wärmesenke zur Abfuhr der Nachwärme und die Notstromversor-

gung den gleichen Schutzgrad erhalten wie der Reaktor und die anderen für die Sicherheit wichtigen Hilfsanlagen.

□ *Besserer Schutz gegen weitere äussere Einwirkungen* wie Flugzeugabsturz usw. Die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse ist aber sehr gering.

□ *Grösserer Freiheitsgrad in der räumlichen Anordnung.* Beim unterirdischen Bau besteht die Möglichkeit, die relative Bodenhöhe jedes Raumes so zu wählen, dass eine optimale Leitungsführung erreicht werden kann. Man kann alle drei Koordinaten ausnützen, anstatt nur über eine Ebene zu verfügen.

□ *Kleinere Baufläche.* Man bedenke dabei allerdings, dass die Baustellen und Lagerplätze eine grössere Fläche benötigen als der Kraftwerkblock. Dazu kommen noch Maschinenhalle, Verteilstation und Kühlanlage, welche kaum unterirdisch gebaut würden. Sollte die Baustelle aus Platzgründen aufgeteilt oder verlegt werden, so würden die Kosten noch stärker angehoben.

□ *Akzeptanz durch die Bevölkerung.* Dieser vermutete Vorteil lässt sich nicht beweisen. Es wäre eine Illusion, darauf zu zählen, und es könnte zu einem unnötigen Sicherheitsdefizit und zu volkswirtschaftlichen Einbussen führen, wenn aufgrund dieser Illusion falsche Entschlüsse gefasst würden.

□ *Seismische Auslegungsgrössen* wären bei einem auf tiefem Fels errichteten Werk vielleicht etwas weniger einschränkend.

Nachteile

□ *Mangelndes Konzept, fehlende Erfahrung und industrielle Unsicherheit.* Das Konzept moderner Kernkraftwerke ist einzig auf die herkömmliche oberirdische Bauweise ausgerichtet worden. Heute besteht keine Bauverfahren mit modernen Kernkraftwerken unter dem Boden. Für den Bauherrn bildet die Tatsache, dass bis heute keine Kaverne im Fels von den für einen 1000-MW-Block erforderlichen Abmessungen erstellt worden ist, ein grosses Risiko. Zwar sind in einigen Fällen in sehr homogenem Gestein solche Kavernen ausgebrochen worden, aber diese dienten nicht der Unterbringung von elektromechanischen Ausrüstungen.

□ *Dichtheit der Kavernenwände.* Es dürfte sehr schwierig sein, die nötige Dichtheit sowohl gegen das Eindringen von Felswasser im normalen Betrieb als auch gegen das Austreten von Gasen bei einem Störfall während der ganzen Lebensdauer der Anlage zu gewährleisten. Dazu muss diese Dichtheit grundsätzlich prüfbar und wiederherstellbar sein.

□ *Seismische Auslegung.* Mit der Verteilung der Anlageräume in viele Einzelkavernen, was durch die Unmöglichkeit des Aushubes von genügend grossen Kavernen zur Unterbringung der normalerweise in einem Gebäude vorhandenen Systeme bedingt ist, treten Probleme der seismischen Auslegung auf. Die Anzahl Räume und deren Verbindungskanäle steigen an. Alle müssen auf Erdbebenbeanspruchung ausgelegt werden, und es braucht dazu zahlreiche Abstützungen, Verankerungen und Verstärkungen von Komponenten und Leitungen, welche alle die Inspektions- und Unterhaltsarbeiten stark erschweren.

□ *Beschränkung der verfügbaren Volumina.* Da die unterirdische Bauweise sehr teuer zu stehen kommt (mindestens das Doppelte der oberirdischen Bauweise), wird man wo immer möglich die Volumina einschränken. Der Betrieb, insbesondere der Unterhalt, wird der Leidtragende sein. Man müsste auch bei späterem Nachrüsten einschränkender disponieren.

□ *Innere Überschwemmungen und Brandgefahr.* Der Schutz gegen innere Überschwemmungen wird erschwert, insbesondere bei den Hilfsanlagen zur Nachwärmeabfuhr. Bei Rohrbruch oder Leckage können sehr grosse Mengen Kühlwasser austreten, welche nach aussen gepumpt werden müssen, unter Umständen mit Überwindung eines grossen Gefälles. Auch der Schutz gegen Brand wird stark erschwert, nicht nur weil damit eine Gefahr interner Überschwemmung verbunden ist, sondern weil noch eine genügende Entqualmung vorgesehen werden muss. Der Mangel an Zutrittsmöglichkeiten stellt einen weiteren Nachteil zur Bekämpfung dieser Störfälle dar.

□ *Herauspumpen des anfallenden Felswassers* [63–66]. Im Normalfall werden die Bauten unterhalb des natürlichen Grundwasserpegels im Felsen zu stehen kommen. Vom Aushubbeginn bis zum letzten Tag der Stilllegungsarbeiten muss dieser Wasseranfall herausgepumpt werden. Das bedeutet eine schwere Belastung, sowohl finanziell als auch in Arbeitsstunden, insbesondere in der Zeitspanne zwischen der Betriebseinstellung und dem Ende der Stilllegung, die Jahre dauern kann.

□ *Zugänge.* Das Fehlen von Zugangsmöglichkeiten, insbesondere von oben durch Dächer, würde dauernd als grosser Nachteil empfunden werden, nicht nur beim Bau, sondern auch bei grösseren Unterhalts- und Nachrüstarbeiten und sicher bei der endgültigen Demontage [10,46]. Die zahlreichen, auf einer normalen Baustelle errichteten Grosskräne müssten sämtliche durch andere

Hebevorrichtungen ersetzt werden, welche auf Böden aufgestellt würden und dadurch wertvolle Arbeitsfläche in Anspruch nehmen.

□ *Sabotage von aussen.* Im Gegensatz zu herkömmlichen Meinungen verbessert die unterirdische Bauweise keineswegs den Schutz gegen Sabotage von aussen. Im Gegenteil, es fehlt in diesem Fall an übersichtlichen, freien Flächen zwischen der Absperrung und dem Eingang zum Kraftwerkblock.

□ *Stilllegung* [46,57,65,66]. Eine der heikelsten Arbeiten einer Stilllegung besteht im Abtransport schwerer, aktivierter Teile. Diese an sich schon sperrigen Teile brauchen eine Abschirmung, so dass deren Beseitigung grosse Probleme darstellt.

Es wäre auch eine Illusion, zu glauben, dass aus der unterirdischen Bauweise gerade beim Abbruch Vorteile zu erwarten wären im Sinne, dass viele aktivierte oder kontaminierte Strukturen an Ort belassen werden könnten. Ein solches Vorhaben entspräche der Eröffnung eines Endlagers für radioaktive Abfälle, und die ganze entsprechende administrative und technische Abwicklung müsste in Gang gesetzt werden.

Die Anforderungen, welche an die Hydrogeologie eines Endlagers gestellt werden, sind grundsätzlich verschieden von denjenigen an ein unterirdisches Kernkraftwerk. Deshalb sollten hier keine falschen Vergleiche gezogen werden. Bei Endlagern sind Trockenheit und langzeitige Sicherung gleichbleibender Eigenschaften wichtig. Bei der kurzen Lebensdauer einer Produktionsanlage fällt diese Anforderung nicht ins Gewicht. Dafür sind die felsmechanischen Eigenschaften, wegen der sehr grossen Spannweiten der Kavernen, von grösster Bedeutung.

Nach heutiger Gesetzgebung werden für beide sehr hohe Anforderungen gestellt. Schliesslich müssen die unterirdischen Bauten am Ende ihrer Lebenszeit gegen Einsturz abgesichert werden. Es muss auch mit den Kosten des Wiederauffüllens gerechnet werden. Weitere obenerwähnte Nachteile gelten uneingeschränkt auch für die Stilllegungsperiode.

□ *Kosten.* Die Gesamtkosten einer unterirdischen Anlage im Vergleich zu einer oberirdischen wurden in zahlreichen Studien auf etwa 120 bis 125% geschätzt. Da für grössere Anlagen keine praktische Erfahrung vorliegt, müssen solche Schätzungen mit Vorsicht betrachtet werden.

□ *Bauzeit.* Die Dauer der Baustelle wird beträchtlich verlängert und wird wegen der Abraumtransporte die Umwelt stärker belasten.

□ **Dauernde Arbeit unter Tag.** Bei manchen Personen stellt dauernde Arbeit ohne Kontakt mit der Aussenwelt eine psychologische Belastung dar. Erfahrungsgemäss ist es auf die Dauer schwierig, gut ausgebildetes Personal an abgelegenen Orten oder unter erschwerten Arbeitsbedingungen zu behalten.

□ **Abraum.** Die anfallende, sehr grosse Menge an Abraum muss weggeführt werden und in einer passenden Depo-

nie gelagert werden. Heute sind solche Deponiestellen, auch für unschädliche, homogene Abfälle, immer schwieriger zu finden. Die Gefährdung durch den intensiven Strassentransport muss berücksichtigt werden.

Von der Erstellungsart unabhängige Aspekte

- **Ästhetische Aspekte**
- **Sozialwirtschaftliche Auswirkungen**
- **Akzeptanz seitens der Bevölkerung**

□ **Notfallpläne und -massnahmen** für die nähere Umgebung

□ **Äussere und innere elektrische Notstromversorgungen**

□ **Haupt- und Nebenkühlwassersysteme, Nachwärmeabfuhrsysteme, Kühltürme** oder direkte Kühlung je nach Standortsituation, Wasserverbrauch, Wärmeabgabe und Beeinträchtigung der Wasserqualität

□ **Anpassungsfähigkeit.** Nachträglicher Anbau eines weiteren Kraftwer-

Literatur

- [1] NUCLEX 72, Basel, A. Wanner & W. Winkler, Underground Nuclear Power Stations. Okt. 1972
- [2] IAEA, Consultants Meeting on Underground Containment S. KSA-AN-116 / ASK-AN-63. Jan. 1974
- [3] Besuch einer Vertretung des Ausschusses 9 des ASCE in Lucens. Vortrag und Aussprache. Mai 1974
- [4] ASCE, American Soc. of Civil Engineers. Manual of Structural Design for NPP Facilities. Chap. 9, The Influence of Siting Concepts on Structural Design Criteria, Draft. Chap. 9.3, Underground Nuclear Facilities, (with author's participation in drafting). Juni 1974
- [5] Nuclear Safety, Vol. 15, (5) Sept.-Okt. 1974, p. 519 ff Underground NPP Siting: A Technical and Safety Assessment. Sept. 1974
- [6] EOS, Aussprache mit Badenwerk-Schluchseerwerk. Juli 1974.
- [7] CDL, Krigsskyddad förläggning av Kärnkraftverk. War protected underground siting of NPP, a summary. 1974
- [8] ASCE, Manual of Structural Design for NPP Facilities Chap. 9.4, Underground NPP - (UNPP). Juni 1975
- [9] ST-172 EIR, Emergency power systems for underground LWR's: a first investigation. Juli 1975
- [10] Nuclear Safety, Vol. 16 (4), July-Aug. 1975, p. 434-435 Comments RE the Article in Vol. 15 (5) by JP Buclin, by the Authors and by the Editor
- [11] WASH-1400, Reactor Safety Study. Okt. 1975
- [12] CDL, Rock siting of NPP from a reactor safety standpoint. Final Report. Nov. 1975
- [13] Norwegian Resources and Electricity Board. Rock cavity construction of NPP. Summary Report. Dez. 1975
- [14] ETHZ, Inst. für Strassen- und Untertagbau, Studie über die Stabilität grosser Kavernen zylindrischer Form. Dez. 1975
- [15] MC, KKW in Kavernen, Phase I. 1975
- [16] OFEL Revue de presse, S.8 No 513, Saudiarabien: AKW in 300 m Tiefe. Juni 1976
- [17] Weekly Energy Report, Britain Studies Underground. Reactors in Environmental Proceeding. Juni 1976
- [18] Electrical World, p. 36-38, Underground Siting is a nuclear Option. Juli 1976
- [19] Memo ST-177, EIR, Réfrigération des CN en caverne. Aug. 1976
- [20] Universität Bern, Tagung «Statusbericht». EIR, Forschungsprogramm - Zielsetzung des Vorhabens. Maggia Ing. Bureau AG, Unterirdische Anordnung in Kavernen (DWR), MCI AG, Unterirdische Anordnung in Kavernen (SWR) und Sicherheitsaspekte. EWI AG, Seismik. EIR, Emergency Power Systems - Réfrigération. Aug. 1976
- [21] Brief vom Autor, KSA-Mitglied, an das BEW geschrieben. Sept. 1976
- [22] TM-ST-432, EIR, Unterirdische KKW. Okt. 1976
- [23] TM-ST-438, EIR, KKW in Kavernen Studie 1975. Nov. 1976
- [24] EIR, KKW in Lockergestein, Studie 1976
- [25] TM-ST-488 EIR, A first assessment of the underground siting of NPP: the rock cavity alternative. Mai 1977
- [26] Vattenfall, Kärnkraft i Berg. Juni 1977
- [27] BMI-SR 44, KFA, Beurteilung der unterirdischen Errichtung von KKW im Boden in einer offenen Baugrube. Juni 1977
- [28] Nucl. Week. SANDIA study says undergrounding has negligible advantage, higher cost. Juli 1977
- [29] SAND 76-0412 / NUREG-0255, Underground Siting of NPP: Potential Benefits and Penalties. Aug. 1977
- [30] Nucl. Eng. Intern., p. 50-52, Finns and Swedes announce results of joint study on underground plant. Aug. 1977
- [31] Nuclear News, Sandia Study: benefits don't offset penalties. Okt. 1977
- [32] ARACOR, Analysis of Public Consequences from Postulated Severe Accident Sequences in Underground NPP. Dez. 1977
- [33] EIR, Layout Study for an Earth Covered PWR NPP (KKG at the Verbois Site?). Dez. 1977
- [34] EIR, KKW in Lockergestein, Studie 1977
- [35] EIR, Layout study for an earth covered PWR NPP. Dez. 1977
- [36] EIR, Vergleichsstudie über sicherheitstechnische Aspekte von unterirdischen und oberirdischen KKW. Jan. 1978
- [37] Underground Design Consultants, Conceptual design and estimated cost of NPP in mined caverns. Jan. 1978
- [38] Sargent & Lundy, Conceptual design and estimated cost of buried «berm contained» NPP. Jan. 1978
- [39] ATW, S. 127-136, BMI-Studienprojekt «Unterirdische Bauweise von KKW». März 1978
- [40] The Aerospace Corporation, Evaluation of the feasibility, economic impact and effectiveness of underground NPP. Final Technical Report. Mai 1978
- [41] California Energy Commission, Evaluation of the feasibility, economic impact, and effectiveness of underground NPP. Mai 1978
- [42] SAND 77-1344 / NUREG CR-0165, A Value Impact. Assessment of Alternate Containment Concepts. Juni 1978
- [43] TM-ST-561, EIR, A survey of underground NPP. Part. 4. The main american studies. Aug. 1978
- [44] Nuclex 78, Basel, S. Pinto & Telleschi Underground siting of NPP. Okt. 1978
- [45] TM-ST-566, EIR, A survey of underground NPP. Part 5. The main european studies. Okt. 1978
- [46] IAEA-SM-234/8, Decommissioning of the Lucens. Experimental Power Station. Nov. 1978
- [47] TM-ST-572 EIR, A safety assessment of a NPP in an open cut excavation. Nov. 1978
- [48] EIR; KKW in Kavernen - Weiterbearbeitung der Studie 1975. Dez. 1978
- [49] EIR, KKW in Kavernen - Teilweise unterirdische Anordnung, Studie 1978
- [50] ANS Annual Meeting, San Diego, Cal., Layout and containment concept for an underground NPP. 1978
- [51] EIR, Alternative containment systems: a quantitative comparison. Febr. 1978
- [52] TM-ST-635 EIR, Alternative Containments Systems a quantitative comparison. Dez. 1979
- [53] TM-ST-634 EIR, The Underground Siting of NPP. Concept alternatives, technical feasibility, safety potential and economic aspects. Vol. I & II. Dez. 1979
- [54] Bericht 382, EIR, A survey of the Underground Siting of NPP. Dez. 1979
- [55] KSA 20/22, EIR, The Underground Siting of NPP. Dez. 1980
- [56] Symposium der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, BRD, 16.-20. März 1981. Unterirdische Bauweise von KKW (UKKW) Japanese Contributions:
- Activities in Japon
- Layout Study of a BWR NPP for underground Siting
- Layout Study of PWR Underground NPP
- A Civil Engineering Study on Underground NPP
- Advanced Containment Concept on Undergr. NPP
- Characteristics of Earthquake Motions around Underground Power House Caverns
- Containment of gaseous Radioactivity in Underground Cavern
- [57] Besuch einer japanischen Vertretung in Lucens, anlässlich der Hannoverkonferenz. Vortrag durch und Aussprache mit dem Verfasser. März 1981
- [58] WP-System AB, Stockholm, letter to the Author RIB-IN-ROC Concept, Safety Tunnel Concept (Ancestor for Filtra Concept). April 1981
- [59] ASK-AN-1112, Symposium der BAGR in Hannover. Apr. 1981
- [60] Technische Rundschau, No 25, Unterirdische KKW. Juni 1982
- [61] NZZ No 27, Zur Unsicherheit der Sicherheit, Beispiel: Unterirdisches KKW. Febr. 1983
- [62] Nucleonics Week, A leading Israeli scientist has recommended against building a NPP underground. Okt. 1983
- [63] 2250.5-2, BG/SNA, Assainissement de l'ancienne. Centrale expérimentale de Lucens. Note sur le comportement du revêtement de la caverne du réacteur. Dez. 1984
- [64] EOS/SNA: Investigations sur les drainages à Lucens (Wassersteigversuche in den Drainagen beim VAKL) Rapport de synthèse des mesures effectuées de mi-sept. à mi-nov. 1984. (Zahlreiche Referenzen zur Frage der Felswasserdrainage). Jan. 1985
- [65] BKW/KWG/SNA: AN-163, Geologie und Hydrologie des Standortes Lucens. Dez. 1985
- [66] EOS/SNA: gleicher Titel wie 64. Rapport complémentaire sur les mesures de févr. 85 et janv. 86.
- [67] Persönliche Mitteilung von Kjell Knudsen, HBWR, an den Verfasser. Aug. 1986

kes, oder Erweiterung von Lagerflächen.

□ *Kontaminationsmöglichkeiten des Grundwassers.* Je nach den geologischen Gegebenheiten kann bei schweren Unfällen mit Kernschmelzen und Containmentleckage eine unter Umständen schwer kontrollierbare Verseuchung des Grundwassers erfolgen. Unter Tage wäre deren Ausdehnung und eventuelle Fassung kaum messbar bzw. durchführbar. Diese Gefahr besteht auch bei oberflächennahem Bau, aber wäre dort unter Umständen leichter zu meistern.

□ *Ventilations- und Klimaanlage.* Die Anforderungen an die Lufttrocknungseinrichtungen wären bei unterirdischen Anlagen eventuell höher, aber andererseits sind dort die Verhältnisse über das Jahr gleichmässiger, was zu Einsparungen führen kann.

□ *Anschluss an das Hochspannungsnetz.*

□ *Anschluss an die externen Transportwege,* seien es Strasse, Bahn oder andere.

□ *Beeinträchtigung durch Lärm.* Leichter Vorteil während des Baus, wenn oberirdisch, während des Betriebs wenn unterirdisch.

Inhärente Sicherheit

Durch die unterirdische Bauweise erreicht man also eine Verstärkung passiver Eigenschaften, welche zur Erhöhung der inhärenten Sicherheit beitragen: Schutz gegen seismische Einwirkungen, gegen Absturz von Flugkörpern und gegen kriegerische Einwirkungen.

Gegen seismische Einwirkungen weiss man sich ebensogut an der Oberfläche zu schützen. Die Wahrscheinlichkeit

des Absturzes eines hochenergetischen Flugkörpers ist äusserst klein; Vollschutz gegen den Absturz ziviler Grossflugzeuge sowie von Militärmaschinen bei Übungen ist möglich und wird in gewissen Ländern oder Gegenden verlangt. Diese Argumente ergeben also keine genügende Begründung für die unterirdische Bauweise.

Hingegen würde eine unterirdische Bauweise zahlreiche positive Eigenschaften abschwächen, welche zur Sicherheit der herkömmlichen Anlagen beitragen. Bei der unterirdischen Bauweise steigt die Anzahl aktiver Systeme und Komponenten, welche wegen der nachteiligen Eigenschaften dieser Bauart zusätzlich vorgesehen werden müssen, an: Wegpumpen des Felswassers; Schutz gegen innere Überschwemmungen, gegen Brand, innere Sabotage; vermehrte Rohr- und Leitungsaufhängungen usw. . . .

Gesamthaft betrachtet erkennt man bei der unterirdischen Bauweise keinen ins Gewicht fallenden Vorteil im Sinne einer Verbesserung der inhärenten Sicherheit.

Schlussfolgerungen

Betrachtet man den hohen Sicherheitsstand und die hohe Zuverlässigkeit, welche beim bisherigen Bau und Betrieb moderner, standardisierter Leichtwasserreaktoren grosser Leistung erreicht wurde und zieht man andererseits die zahlreichen Nachteile, ganz abgesehen von den enormen Unsicherheiten, welche mit der unterirdischen Bauweise gekoppelt sind, in Betracht, so besteht kein triftiger Grund, zu Überlegungen aus der Urzeit der Kerntechnik zurückzukehren, um sich in neue

Schwierigkeiten technischer, wirtschaftlicher und psychologischer Art – welche offenbar sehr beträchtlich sind – zu stürzen.

Adresse des Verfassers: J.-P. Buclin, c/o Société Anonyme l'Energie de l'Oueste Suisse (EOS), case postale 570, 1001 Lausanne.

Der Verfasser ist Diplomingenieur der ETH Zürich und gegenwärtig Vizedirektor der westschweizerischen Elektrizitätsgesellschaft EOS. Er arbeitete während 14 Jahren an zwei der vier weltweit realisierten unterirdischen Kernreaktoranlagen. In den Jahren 1959 bis Ende 1962 leitete er die elektromechanische Abteilung beim Bau und bei der Inbetriebnahme des Versuchsreaktors HBWR in Norwegen. Zwischen 1963 und 1964 führte er Sicherheitsstudien für das schweizerische Versuchs-Atomkraftwerk Lucens durch. Anschliessend leitete er im Namen der Arbeitsgemeinschaft Lucens die Vorbereitung und die Durchführung der Inbetriebnahme und der nuklearen Versuche mit dieser Anlage. Nach dem Störfall im Januar 1969 war er mit der Demontage des Reaktors betraut, welche er Ende 1972 abschloss. Überdies wirkte er im März 1964 als eingeladener Gast an der Inbetriebnahme des Fernheizkraftwerkes AGESTA in Schweden mit.

Der Verfasser war von 1967 bis Ende 1986 Mitglied der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), die den Schweizerischen Bundesrat berät und zu Gesuchen für Bau, Inbetriebnahme, Nachrüstung und Stilllegung von nuklearen Anlagen Stellung nimmt. Die KSA gibt Richtlinien heraus und äussert sich zu generellen Fragen der Kerntechnik, so zum Stand von Wissenschaft und Technik, auf diesem Gebiete. Den vorliegenden Bericht schrieb der Verfasser auf Wunsch dieser Kommission.