

Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 56 (1964)
Heft: 9-10

Artikel: Das Atomkraftwerk Lucen und die weitere Entwicklung des schweizerischen Reaktorbaus = La centrale nucléaire de Lucens et le développement de la construction de réacteurs en Suisse = The Lucens nuclear power station and the further development of the Swi...

Autor: Bauer, B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-921829>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

DAS ATOMKRAFTWERK LUCENS UND DIE WEITERE ENTWICKLUNG DES SCHWEIZERISCHEN REAKTORBAUS

Prof. Dr. B. Bauer, Zürich

DK. 621.311:621.039 (494)

1. EINLEITUNG

Der schweizerische Elektrizitätsverbraucher steht vor einer Strukturänderung seines Produktionssystems. Ueber Jahrzehnte der Entwicklung, d. h. seit Anbeginn, vermochte der fortschreitende Ausbau der landeseigenen Wasserkräfte den Bedarf zu decken. Heute ist der Abschluss dieses Prozesses voraussehbar, und der kommende Mehrbedarf an elektrischer Energie wird von thermischen Kraftwerken aufgebracht werden müssen. Damit tritt ein neues, die bisherige Unabhängigkeit der Elektrizitätserzeugung beeinträchtigendes Element in Erscheinung: die Abhängigkeit der Landesversorgung vom ausländischen Brennstoff.

Das Diagramm in Bild 1 lässt mit einem Blick die ange deuteten Verhältnisse erkennen. Die in blauer Farbe angelegten Stäbe zeigen für 16 hydrologische Jahre ab 1964/65 bis 1979/80 den Verlauf der Produktionskapazität der schweizerischen hydraulischen Kraftwerke bei mittlerer Wasserführung. Die Darstellung umfasst die heute im Betrieb stehenden Werke, die im Baustadium befindlichen und die projektierten hydraulischen Anlagen*. Die eingezeichnete Kurve des geschätzten Verbrauchs wurde aufgrund eines jährlichen Zuwachses von 6% festgelegt. Sie begrenzt nach oben die wachsenden Fehlenergie m e n g e n, welche durch die thermischen Kraftwerke (in gelber und roter Farbe gekennzeichnet) gedeckt werden müssen. Zwar ist die Abhängigkeit vom ausländischen Brennstoff in der in Bild 1 dargestellten Zeitspanne noch nicht beängstigend (sie wird fühlbarer in trockenen Jahren, in welchen die hydraulische Produktion auf etwa 80% des Wertes bei mittlerer Wasserführung zurückgeht). Nun wird der jährliche Verbrauch natürlich über 1979/80 hinaus weiter ansteigen, vielleicht nicht mehr im gleichen Mass; die hydraulische Energieerzeugung verbleibt aber vermutlich auf dem für das Jahr 1979/80 ermittelten Höchstbestand. Der thermischen Energieproduktion kommt daher in den folgenden Dezennien ein erhebliches Gewicht zu, womit sich die bestmögliche Sicherstellung der Landesversorgung zu einer volkswirtschaftlich bedeutungsvollen Aufgabe auswächst.

Die an der Energieversorgung interessierten Kreise, wie auch die eidgenössischen und kantonalen Behörden waren sich schon vor Jahren in der Ueberzeugung einig, dass der Einsatz der Kernenergie aus bekannten Gründen geeignet ist, die Abhängigkeit vom ausländischen Brennstoff in erträglichen Grenzen zu halten, vorausgesetzt, dass man die Atomkraftwerke mit Reaktoren ausrüstet, für deren Spaltstoff ein Markt besteht. Man war sich auch einig darüber, dass durch den Aufbau einer schweizerischen Reaktorindustrie eine weitere Grundlage zur Erhaltung der bestmöglichen Unabhängigkeit der Landesversorgung geschaffen werden müsse. Dass damit auch den Exportinteressen unserer Industrie gedient wird, sei hier nur nebenbei vermerkt.

Aus diesen Ueberlegungen ist vor 15 Jahren das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung (EIR) gegründet worden, das heute zur Organisation der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) gehört und sich im Verlauf der Zeit zu einem bemerkenswerten zentralen Institut

für die einschlägige Forschung ausgebildet hat. Die Betreuung der industriellen Seite des Reaktorbaus ist der im Jahr 1961 gegründeten Nationalen Gesellschaft zur Förderung der industriellen Atomtechnik (NGA) überwiesen worden, an welcher alle am Aufbau einer schweizerischen Atomtechnik interessierten Wirtschaftskreise beteiligt sind.

Die NGA führt zurzeit zwei Hauptaufgaben durch. Sie ist erstens als Bauherrin des Versuchsatomkraftwerks Lucens für dessen Planung, Bau und Erprobung verantwortlich, wobei die materielle Durchführung einer aus schweizerischen Ingenieur- und Konstruktionsfirmen zusammengesetzten Arbeitsgemeinschaft übertragen ist. Die NGA hat ferner über ihre Kommission für Entwicklungsstudien (EK) die Vorbereitung des nächsten Schritts nach Lucens, die Erstellung eines Leistungskraftwerks übernommen, wobei die Fragen der Reaktorwahl an erster Stelle stehen. Die Studien erfolgen in enger Zusammenarbeit mit dem EIR. Diese Untersuchungen werden in nützlicher Weise durch den Erfahrungsaustausch befruchtet, den die NGA mit ausländischen Fachgremien in die Wege geleitet hat. Der Zeitplan dieser Aufgaben der NGA ist als unverbindliche Orientierung in das Diagramm in Bild 1 eingetragen.

2. DAS VERSUCHSATOMKRAFTWERK LUCENS

Es ist hier nicht der Raum für eine ausführliche und alles umfassende Beschreibung dieser Anlage. Der Autor beschränkt sich daher auf die Skizzierung einiger typischer Merkmale dieses ersten Lehrstücks des schweizerischen Reaktorbaus. Für alle weiteren Einzelheiten sei auf die ausführliche Werkbeschreibung von dipl. ing. P. Krafft im Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, Bd. 53 (1962) No. 13, verwiesen.

Die erste Aufgabe war die Wahl der in der Schweiz zu verfolgenden Reaktorentwicklungslinie. Die NGA hat sich für den Schwerwassertyp entschieden. Wir glauben, dass die Wahl glücklich war. Diese Linie gehört zwar nicht zu den am weitesten fortgeschrittenen, insbesondere steht ihr die eigentliche Bewährungsprobe noch bevor. Auf der anderen Seite sind ihre längerfristigen Aussichten vielversprechend. Die gute Neutronenökonomie sichert eine günstige Ausnutzung des Brennstoffs; die einfachen Brennstoffelemente aus natürlichem Uran ergeben geringe Brennstoffkosten. Die Verwendung von Natururan oder solchem mit leichter Anreicherung erlaubt den Verzicht auf die Rückgewinnung des im verbrauchten Brennstoff noch vorhandenen Spaltmaterials. Die Aussichten der möglichen Ueberleitung zum thermischen Brüter im Thoriumzyklus sind günstig.

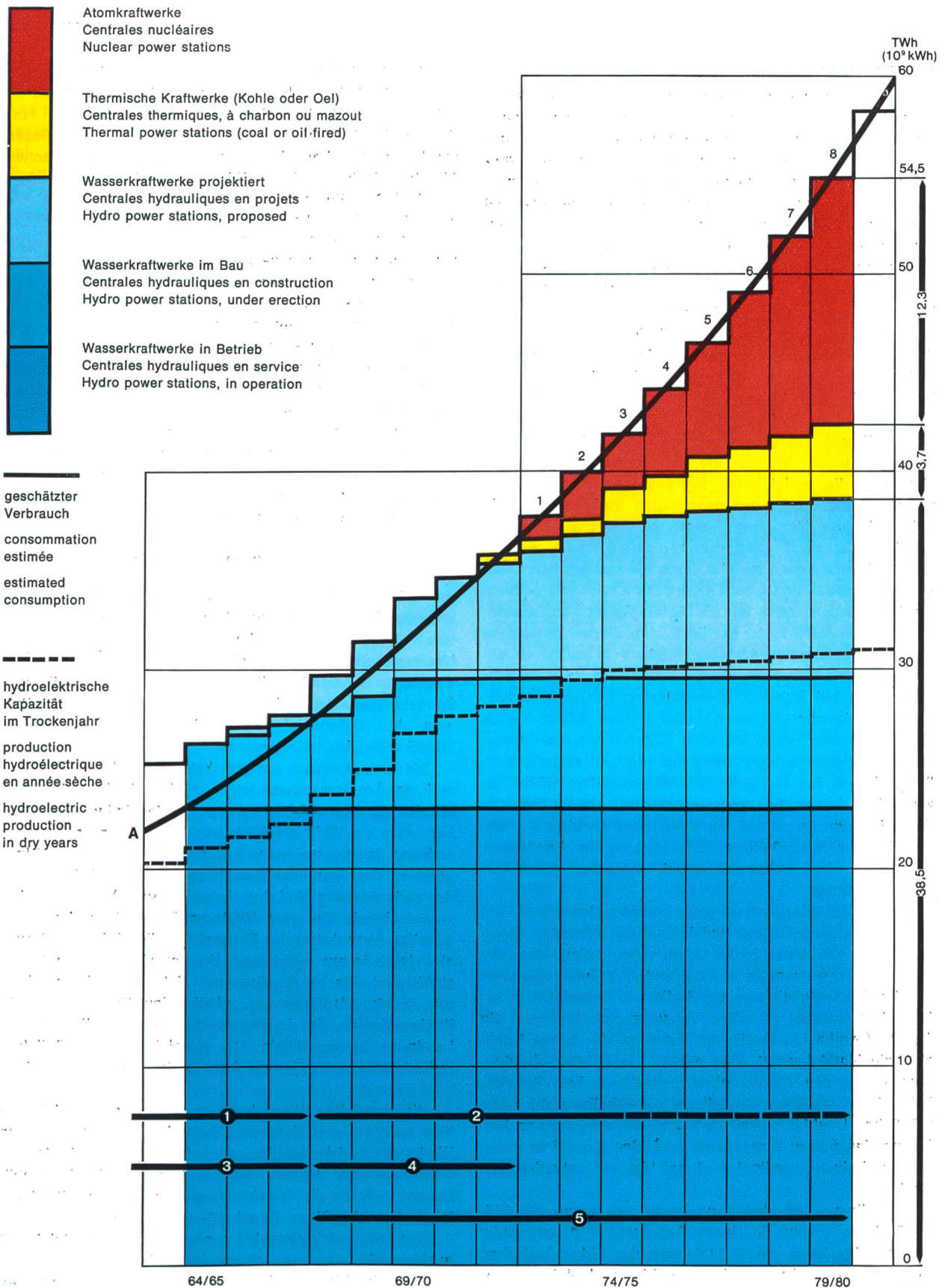
Die gewählte Werkkonzeption ergab sich aus dem Zweck dieser Versuchsanlage. In Lucens sollen neue Werkstoffe und Konstruktionen auf ihre Eignung im Dauerbetrieb erprobt werden. Das Werk soll auch als Ausbildungsschule für die Projektierungsingenieure und Betriebsleiter der zukünftigen Atomkraftwerke dienen.

Das Versuchskraftwerk Lucens weist im Vergleich mit ausländischen Anlagen einige neue Ideen auf.

An erster Stelle ist die Kavernenbauweise zu erwähnen, welche den besonderen schweizerischen Verhältnissen entspricht und sicherheitstechnische Vorzüge bietet. Die gewählte Ausnützung des Felses als Containment, d. h. als

*) Die Grundlagen über die hydraulische Produktionskapazität sind von Dr. Pedrolì vom Eidg. Amt für Wasserwirtschaft ermittelt worden.

Fig. 1
 Deckung des Energiebedarfs der Schweiz von 1964/65 bis 1979/80
 Couverture de la demande d'énergie en Suisse de 1964/65 à 1979/80
 How the energy demand will be covered in Switzerland from 1964/65 up to 1979/80



- 1 Bau und Erprobung Werk Lucens — Construction et essais, Centrale de Lucens — Erection and testing, Lucens power station
- 2 Versuchsbetrieb Werk Lucens — Service expérimental de la centrale de Lucens — Experimental operation of the Lucens power station
- 3 Studien zur Reaktorwahl — Etudes au sujet du choix du type de réacteur — Studies about the suitability of various reactor designs
- 4 Planung und Bau des ersten schweizerischen Atomkraftwerkes — Etude et réalisation de la première centrale nucléaire suisse — Planning and erection of the first Swiss nuclear power station
- 5 Weitere Reaktor-Entwicklung — Développement ultérieur en matière de réacteurs — Further development on reactor designs

Schranke gegen die Freigabe radioaktiver Spaltprodukte, die bei einem schweren Reaktorunfall entstehen können, hat eine Reihe neuer Untersuchungen und Versuche erfordert, die zu einem guten Ergebnis geführt haben. Damit soll nicht gesagt sein, dass der Kavernenbau auch für die weiteren noch zu erstellenden Atom-Kraftwerke gewählt werden wird.

Der Reaktor selbst enthält eine Anzahl erwähnenswerter Merkmale. Er ist schwerwassermodert und gasgekühlt. Jedes Spaltstoffelement ist in ein Druckrohr eingebaut, welches dem Druck des primären Kühlmittels ausgesetzt ist (ca. 60 kg/cm²). Die Druckrohre können zusammen mit den Spaltstoffelementen ausgebaut werden. Dieses System ermöglicht in der gleichen Anlage die Erprobung verschiedener Brennstoffarten, Elementumhüllungen und sogar Kühlmittel. Als Kühlmittel für den Reaktor von Lucens ist zunächst Kohlendioxyd vorgesehen. Die erste Brennstoffladung besteht aus Stäben aus metallischem, leicht angereichertem Uran, die in Hülzen aus einer Magnesiumlegierung eingeschlossen sind.

Es ist die Möglichkeit einer späteren Umstellung auf Dampfkühlung vorgesehen.

Der Reaktor von Lucens nimmt innerhalb der mit natürlichem Uran und Magnesium-Umhüllungen arbeitenden Reaktoren, die mit Kohlendioxyd gekühlt werden, einen guten Platz ein. Dank dem hohen Druck des Kühlmittels kann eine gute spezifische Leistung erzielt werden. Die spätere Verwendung von Uranoxyd dürfte erlauben, die Temperatur des Gases am Reaktorausstritt auf etwa 520° C zu steigern, was zu einer Dampfqualität führt, wie sie für Hochtemperatur-Reaktoren vorgesehen ist, und dies, ohne dass neue Techniken angewendet werden müssten. Gleichzeitig könnte die spezifische Leistung ungefähr verdoppelt werden, wobei allerdings eine gewisse Anreicherung in Kauf genommen werden müsste.

Das Werk liegt rund 2 km von der Ortschaft Lucens entfernt auf dem linken Ufer der Broye, an der Kantonsstrasse Lausanne-Bern.

Ueber die Werkdisposition orientieren die Bilder 2, 4, 5 und 6. Wie aus den Längs- und Querschnitten ersichtlich, sind die unterirdischen Räumlichkeiten in drei getrennte Kavernen unterteilt: die Reaktorkaverne, die Maschinenkaverne und jene des Stablagars. Die Legenden zu den Bildern geben weiteren Aufschluss über die Zweckbestimmung der einzelnen Räumlichkeiten.

Es mag den Leser interessieren, noch einige Einzelheiten der Reaktorkonstruktion kennenzulernen. Wie schon gesagt, ist der Reaktor im Lucenswerk mit schwerem Wasser modert, CO₂-gasgekühlt und mit metallischen Uranstäben mit einer Umhüllung aus einer Magnesiumlegierung ausgerüstet. Der Moderator befindet sich in einem zylindrischen Aluminiumtank. In diesem Gefäss sind 73 Rohre (ebenfalls aus Aluminium) von 145 mm Innendurchmesser angeordnet, die oben und unten mit den Tankböden verschweisst sind. Auf diese Weise entstehen im Innern des Reaktors, parallel zur Achse des Moderatortanks, ebensovielen Kanäle, in welche die Spaltstoffelemente eingeführt werden können. 12 weitere ähnliche Rohre mit etwas kleinerem Durchmesser sind für die Aufnahme der Kontrollstäbe vorgesehen.

Die Temperatur des schweren Wassers bleibt unter 80 °C; es steht unter schwachem Ueberdruck. Unter diesen Betriebsbedingungen eignet sich das Aluminium dank seiner guten Neutronendurchlässigkeit als Baumaterial vorzüglich.

Das System der Druckrohre, des Spaltstoffs und seiner Kühleinrichtungen ist an einem metallischen Behälter befestigt, der über dem Moderatortank angeordnet ist. Dieser Behälter, der ähnlich wie der Moderatortank gebaut ist, wird mit gewöhnlichem Wasser gefüllt und dient gleichzeitig als Strahlungsabschirmung. Ueber jedem Rohr für die Spaltstoffelemente be-

findet sich ein Anschlusskopf, an dem die Druckrohre mit Hilfe eines Bajonettverschlusses befestigt sind. Diese Druckrohre tauchen in die Rohre des Moderatortanks. Der die Druckrohre umgebende, mit CO₂ gefüllte Ringspalt dient gleichzeitig als Wärmeisolation. Die Anschlussrohre, die das CO₂-Gas für die Kühlung jedes einzelnen Spaltstoffelements zu- und ableiten, verbinden den Oberteil der Anschlussköpfe mit den Ein- und Austrittskollektoren. Regulierventile erlauben es, die Menge des Kühlmittels für jedes Element einzustellen.

Der Moderatortank ist von einer Anzahl zylinderförmiger Stahlabschirmungen umgeben, die innerhalb der biologischen Abschirmung angeordnet sind. Diese besteht aus einer Betonschicht von ca. 2,8 m Dicke. Unterhalb des Moderatortanks befindet sich ein weiterer Abschirmbehälter zum Schutze des Raumes der Wechselmaschine. Der Moderatortank ruht auf der unteren Abschirmung, wobei die Anordnung so getroffen wurde, dass der Tank bei Bedarf, z. B. bei Reparaturen, in den Wechselmaschinenraum abgesenkt werden kann. Während des Betriebs ist der Wechselmaschinenraum nicht zugänglich. Demgegenüber muss der obere Boden für kurze Zeit betreten werden können. Zu diesem Zweck wurde über dem Verteilraum der Anschlussrohre eine zusätzliche Abschirmung vorgesehen. Auf diesem oberen Boden befindet sich das Spaltstoffelement-Wechselwerkzeug, mit welchem die Bajonettverschlüsse der Druckrohre an den Anschlussköpfen betätigt werden können. Die Kontrollstabantriebe befinden sich ebenfalls auf dem oberen Boden. Der Wechselmaschinenraum, der Spaltstrom zwischen den Stahlabschirmungen und der biologischen Abschirmung und der Verteilraum der Anschlussrohre stehen miteinander in Verbindung und sind mit CO₂ gefüllt, das unter einem leichten Ueberdruck steht, um jeden Lufteintritt zu verhindern. Im Betrieb wird sich der untere Raum auf ca. 50 °C erwärmen, während die Temperatur im Verteilraum der Anschlussrohre auf 300 °C ansteigen kann.

Eines der kennzeichnendsten Merkmale des Reaktors Lucens sind seine demontierbaren Druckrohre (Fig. 7). Sie bilden, zusammen mit dem Spaltstoffelement, das sie enthalten, eine Einheit, die gemeinsam ausgewechselt werden kann. Auf diese Weise wird eine grosse Anpassungsfähigkeit des Reaktors erzielt; es ist dadurch möglich, Elemente verschiedener Bauart, wenn nötig gleichzeitig, einzusetzen.

Die Druckrohre nehmen den Druck des Kühlmittels (ca. 60 kg/cm²) auf. Sie werden vom «kalten» CO₂ durchspült, das bei einer Nenntemperatur von 220 °C in das Element eintritt. Das einzige Material, das unter diesen Bedingungen eine genügende mechanische Festigkeit besitzt, korrosionsbeständig ist und eine kleine Neutronenabsorption aufweist, ist Zircaloy-2 (eine Zirkon-Legierung). Die Druckrohre sind unten geschlossen, so dass das Kühlmittel der Aussenwand entlang nach unten und im Innern der darin befindlichen Spaltstoffelemente nach oben strömt. Beim Uebergang auf den Anschlusskopf strömt das Kühlmittel durch zwei konzentrische Kanäle. Auf diese Weise wird nur die äussere Dichtung durch den gesamten Druck beansprucht. Ein federndes System sorgt für einen gleichmässigen und gleichbleibenden Auflagedruck und sichert die Dichtheit dieser Verbindung. Die innere Dichtung wird nur durch die kleine Druckdifferenz zwischen Ein- und Austritt beansprucht.

Das eigentliche Spaltstoffelement besteht aus einem Graphitträger, der in das Druckrohr eingeführt und an dessen Boden mit Hilfe eines Bajonettverschlusses befestigt wird. Dieser Graphitträger weist sieben Bohrungen auf, in denen sich je ein Uranstab (Spaltstoffstab) befindet. Somit dient der Graphitträger sowohl zur Führung des Kühlmittels als auch zur Halterung für die Spaltstoffstäbe.

Jeder Spaltstoffstab besteht aus vier ineinander verschraubten Segmenten und weist eine Gesamtlänge von 2,765 m auf. Er ist an seinem unteren Ende am Graphitträger befestigt und kann sich somit nach oben in seinem Kanal frei ausdehnen.

Die Spaltstoffsegmente sind zylinderförmig. Sie bestehen aus leicht legiertem Uran und weisen einen Durchmesser von 17 mm und eine Länge von 650 mm auf. Ihre gasdichte Umhüllung (Dicke 1,75 mm) besteht aus einer Magnesium-Legierung und trägt eine Anzahl von Rippen, die den Wärmeübergang verbessern.

Die Kontrollstäbe bestehen aus zwei konzentrischen Rohren, deren Zwischenraum mit einer Neutronen absorbieren-

den Kadmium-Silber-Legierung ausgefüllt ist. Sie werden innen und aussen durch einen CO₂-Strom gekühlt.

Mit Hilfe von Drahtseilen werden die Kontrollstäbe, durch die auf dem oberen Boden befindlichen Antriebe, Führungen entlang bewegt. Ihre Bewegung ist durch Endschalter begrenzt. Sie besitzen ferner einen Anzeiger für die Ueberwachung des Seilzuges, Stossdämpfer usw. Die Demontage erfolgt mit Hilfe der Spaltstoff-Wechselmaschine.

Die Spaltstoff-Wechseleinrichtungen dienen zum Transport der Spaltstoffelemente, der Druckrohre und der Kontrollstäbe vom Spaltstofflager zum Reaktor und zurück. Die Einrichtungen müssen zahlreichen Anforderungen genügen, insbesondere beim Entladen der bestrahlten Elemente.

Die bestrahlten Spaltstoffelemente sind stark radioaktiv. Es sind daher Abschirmungen und Fernsteuerungen nötig, um während des Manövrierens den Schutz des Personals zu gewährleisten. Zudem strahlen diese Elemente eine bestimmte Restwärme ab, so dass es nicht zulässig ist, sie über eine gewisse Zeit hinaus ohne besondere Kühlung zu lassen. Schliesslich muss damit gerechnet werden, dass die Elemente bei einer Beschädigung der Umhüllung radioaktive Gase austreten lassen. Es muss daher möglich sein, das Druckrohr gasdicht abzuschliessen, bevor es in das Stablager übergeführt wird.

Vor dem Entladen muss der Druck im Kühlkreislauf des Reaktors auf atmosphärischen Druck gesenkt werden. Dieses Absenken ist erst mehrere Stunden nach dem Abstellen des Reaktors möglich, wenn das Abstrahlen der Restwärme soweit abgeklungen ist, dass die reduzierte Gebläseleistung für die Kühlung des Reaktors genügt.

Das Entladen geht so vor sich, dass das Wechselwerkzeug auf dem oberen Boden und die Wechselmaschine unter dem Reaktor in die dem auszuwechselnden Element entsprechende Stellung gebracht werden. Die Hebeeinrichtung der Wechselmaschine ergreift das untere Ende des Druckrohres. Es ist jetzt mit Hilfe des Wechselwerkzeuges möglich, den Anschlusskopf, an dem das Druckrohr aufgehängt ist, zu lösen. Die Hebeeinrichtung der Wechselmaschine zieht das Druckrohr und das darin enthaltene Spaltstoffelement nach unten heraus, während das Wechselwerkzeug gleichzeitig einen entsprechenden Deckel am

Anschlusskopf befestigt, der den Kühlkreislauf des Reaktors schliesst. Die Wechselmaschine bewegt sich nun zur Transfer-Oeffnung, die normalerweise durch einen Schieber verschlossen ist, so dass zwischen dem Wechselmaschinenraum und der Stablagerkaverne ein gasdichter Abschluss besteht.

Die Wechselmaschine ist nicht abgeschirmt; daher kann der sie enthaltende Raum nicht betreten werden solange sie ein bestrahltes Element enthält. Die Maschine wird deshalb von einem in der Stablagerkaverne befindlichen Pult aus ferngesteuert.

In der Stablagerkaverne befindet sich eine Transferflasche, die mit einer starken Blei-Abschirmung versehen ist. Sobald die Transferflasche auf den Transferschieber aufgesetzt wird, kann dieser geöffnet werden. Die Hebeeinrichtung der Transferflasche erfasst nun mit Hilfe eines Greifers das Druckrohr und zieht es in die Flasche hinauf. Darauf wird die Transferflasche über das Stablagerbassin gefahren, und das Druckrohr mit dem Spaltstoffelement kann in das Bassin gesenkt werden.

Es sei zum Schluss noch auf die neuartige Konstruktion der Dampferzeuger verwiesen (Fig. 8).

Der CO₂-Gaskreislauf ist vollständig verschweisst mit Ausnahme der Gebläse, die an die Dampferzeuger angeflanscht sind. Der Antrieb der Gebläse erfolgt durch Asynchron-Motoren mit einer Drehzahl von 3000 U./min, die am 6-kV-Netz angeschlossen sind. Bei Ausbleiben der Spannung am 6-kV-Netz kann der Motor mittels Hilfswicklungen aus dem 380-kV-Netz unter 750 U./min betrieben werden, wodurch die Kühlung sichergestellt ist. Die Dampferzeuger befinden sich über dem Reaktor, so dass sich auch im unwahrscheinlichen Fall eines vollständigen Unterbruchs der elektrischen Speisung ein natürlicher Umlauf einstellen kann. Dieser genügt, um die Restwärme des Reaktors an den Notkühlkreislauf zu übertragen.

Die Dampferzeuger arbeiten mit Zwangsumlauf. Ein Zentrifugal-Wasserabscheider ist zwischen dem Verdampfer und dem Ueberhitzer eingeschaltet. Das Medium des Sekundärkreislaufs (Wasser und Dampf) strömt von unten nach oben in glatten, schraubenförmigen Rohren. Das CO₂ fliesst im Gegenstrom von oben nach unten.

Die einstufigen Radialgebläse weisen eine mechanische Zweikammerdichtung auf; als Sperrflüssigkeit dient Wasser.

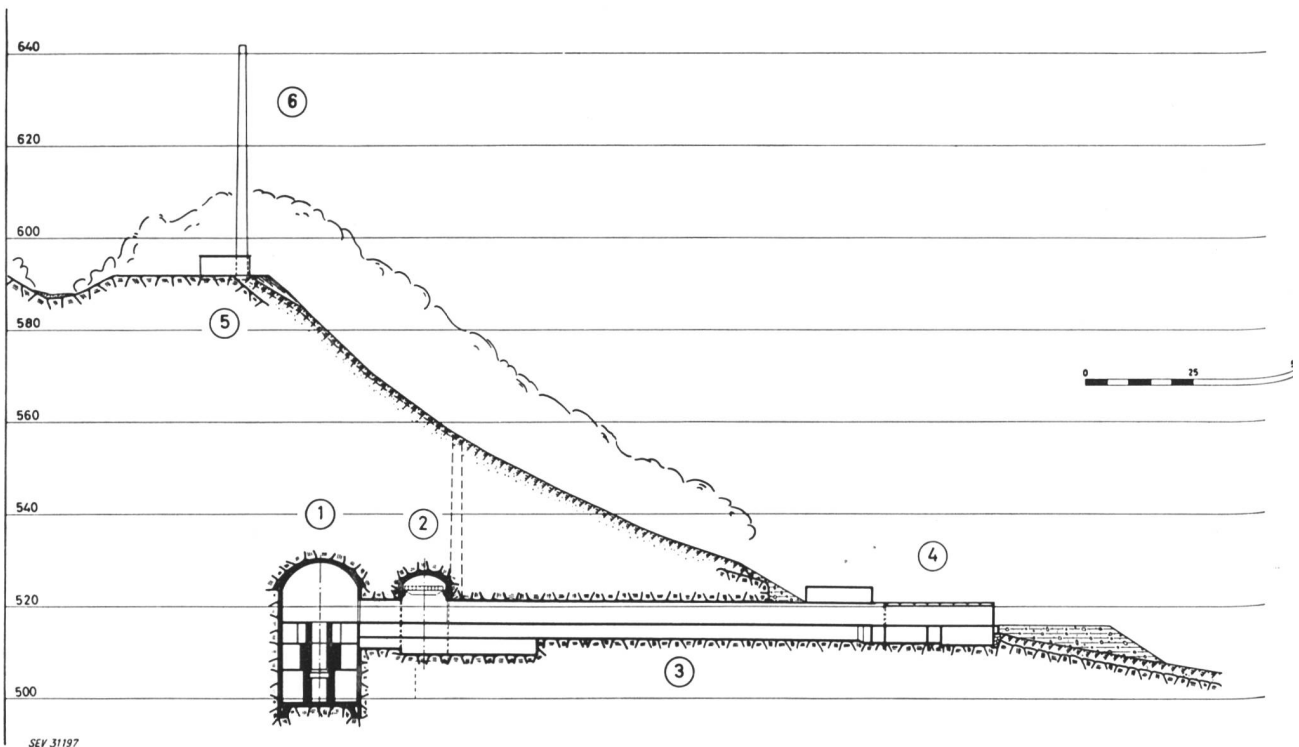


Fig. 2 Lucens: Längsschnitt — profil en long — longitudinal section

1 Reaktorkaverne 2 Maschinenkaverne 3 Zugangsstollen 4 Betriebsgebäude 5 Kamingebäude 6 Hochkamin

1 Caverne du réacteur 2 Caverne des machines 3 Galeries d'accès 4 Bâtiment de service 5 Station supérieure 6 Cheminée de ventilation

1 Reactor cave 2 Machine cave 3 Access gallery 4 Service building 5 Upper station 6 Ventilation chimney

Der Frischdampf weist eine Temperatur von 370 °C und einen absoluten Druck von 21,5 kg/cm² auf, doch ist der Sekundärkreislauf für 500 °C und 60 kg/cm² ausgelegt, damit in einem späteren Zeitpunkt Spaltstoffelemente, die eine höhere Betriebstemperatur zulassen, verwendet werden können. Um die Kosten der Anlage niedrig zu halten, wurde ein sehr einfacher Wärmezyklus in Aussicht genommen, was allerdings den thermodynamischen Wirkungsgrad herabsetzt. Selbstverständlich würde sich eine Anlage grösserer Leistung in dieser Hinsicht bedeutend günstiger gestalten.

Bei der Turbine handelt es sich um eine Aktions-Turbine klassischer Bauart. Sie erzeugt 8,55 MW bei 3000 U./min. Sie besitzt Spezialdichtungen, die keine Leckage aufweisen.

Wenn der Reaktor in einem späteren Zeitpunkt mit Wasserdampf gekühlt werden sollte, wäre es möglich, den Dampf des Primärkreislaufs direkt in der Turbine zu verwenden.

Ueber die Massnahmen zur Wahrung der nuklearen Sicherheit des Lucenswerks sei folgendes erwähnt.

Während des normalen Betriebs der Anlage besteht keine Gefährdung der Bevölkerung der Umgebung. Abgase und Abwässer aus dem Werk werden laufend überwacht und vor der gefahrlosen Beseitigung genau untersucht. Die betriebliche Sicherheit wird unter anderem durch geschultes Personal, welches besondere Betriebsvorschriften streng zu beachten hat, erreicht. Das Werkpersonal, welches zu den unterirdischen Anlagen Zutritt hat oder sonst mit Radioaktivität in Berührung kommen kann, steht unter strenger Ueberwachung des werkeigenen Strahlenüberwachungsdienstes. Die weitgehend doppelte oder mehrfache Ausführung der wichtigsten Kontrollorgane in paralleler Anordnung, ein umfassendes Warnungs- und Sicherheitssystem sowie die der Anlage inhärente Sicherheit vermindern weitgehend die Möglichkeit einer schweren Reaktorhavarie. Ausserdem sorgt die unterirdische Disposition des Atomkraftwerks dafür, dass selbst nach dem hypothetisch schlimmsten Unfall die Bevölkerung der Umgebung und das Betriebspersonal den bestmöglichen Schutz erhalten.

Die Reaktorkaverne ist gegen aussen durch das Containment abgeschlossen. Durch geeignete Gestaltung der Wandung wird der Reaktorkaverne eine gute Dichtigkeit verliehen. Die Druckfestigkeit dieser Kaverne ist für den Ueberdruck des hypothetisch schlimmsten Unfalls ausgelegt.

Die Reaktorkaverne und die übrigen unterirdischen Bauten sind mit getrennten Drainagesystemen ausgerüstet, in denen das anfallende Felswasser gesammelt und in die Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle abgepumpt wird.

Alle Zugänge zur Reaktorkaverne sind während des Betriebs durch Schleusen und Panzertüren luftdicht und druckfest abgeschlossen. Die Anforderungen an die Gasdichtheit der Schleusen und Durchdringungen zwischen Reaktorkaverne und Maschinenkaverne erlauben selbst bei einem schweren Reaktorunfall ohne Kontaminationsgefahr die weitere direkte Entlüftung der Maschinenkaverne und des Zugangstollens.

Der nach einem schweren Reaktorunfall entstandene Ueberdruck senkt sich anfänglich sehr rasch infolge Abkühlung des Luft-Dampf-CO₂-Gemisches. Zu geeigneter Zeit wird der restliche Ueberdruck in der Kaverne reduziert, indem durch Öffnen von Ventilen mit vorgeschalteten Reduziert die Gasmassen über das Drainagesystem in den porösen Fels abgelassen und dort gespeichert werden können.

ANLAGEDATEN

Reaktor

Typ	Druckrohrreaktor
Moderator	Schweres Wasser (D ₂ O)
Kühlmittel	Kohlendioxyd (CO ₂)
Spaltstoff	Uranmetall ca. 0,93 % angereichert
Spaltstoffmenge	5,64 t Uran
Anzahl Spaltstoffelemente	73
Thermische Nennleistung	30 MW
Maximaler thermischer Neutronenfluss im mittleren Spaltstoffelement	$3,2 \cdot 10^{13}$ Neutronen/cm ² s

Primärkreislauf

Mittlerer Systemdruck	60 kg/cm ²
Temperatur am Elementeintritt	220 °C
Temperatur am Elementaustritt	385 °C

Sekundärkreislauf

Frischdampfmenge	39,6 t/h
Frischdampfdruck abs.	21,5 kg/cm ²
Frischdampf Temperatur	370 °C
Speisewassertemperatur	147 °C
Leistung an der Turbinenwelle	8,55 MW

Elektrische Anlagen

Drehstromturbogenerator	13 MVA, 6 kV, 50 Hz
Kupplungstransformator	10 MVA, 6/60 kV

3. DIE WEITERE ENTWICKLUNG DES SCHWEIZERISCHEN REAKTORBAUS

Das Versuchsatomkraftwerk Lucens stellt im Zug der schweizerischen Reaktorentwicklung den Abschluss einer ersten grundlegenden Etappe dar. Die damit zu gewinnenden Erfahrungen für die weitere Entwicklung werden wertvoll sein, aber nicht hinreichend zur Erzielung der vollen Wettbewerbsfähigkeit unserer Reaktoren auf dem Weltmarkt. Wie in anderen Industrieländern, die die Kernenergienutzung entwickeln, können auch wir in der Schweiz dieses Ziel nur mit Hilfe fortschreitender Erfahrungsergebnisse aus dem Betrieb weiterer Atomkraftwerke eigener Konstruktion erreichen, wobei jeder neue Schritt durch dahinzielende Entwicklungsstudien vorbereitet werden muss. Hieran werden auch die gezielten Ergebnisse des Versuchsbetriebs in Lucens ihren Beitrag leisten.

Das Ziel des schweizerischen Reaktorbaus hat zwei Aspekte: Die Erhaltung und Erweiterung unseres Exportpotentials einerseits und die Belieferung der schweizerischen Atomkraftwerke mit konkurrenzfähigen und unseren Produktionsverhältnissen angepassten Reaktoren andererseits. Da wir mit dem Einsatz der Kernenergie in die Stromversorgung ohnehin auf den Bezug des Spaltstoffs vom Ausland angewiesen sein werden, hoffen die Elektrizitätsverbraucher, dass diese Abhängigkeit wenn immer möglich nicht noch dadurch erhöht wird, dass die Produzenten auch für den wesentlichen Teil der Atom-Kraftwerke, den Reaktor mit seinem nuklearen Zubehör, von ausländischen Lieferanten abhängig werden, zumal damit auch der Anreicherungsgrad des zu beschaffenden Uran-Spaltstoffs festgelegt wird. Von diesem Gesichtspunkt aus betrachtet, ist daher die baldige Einsatzbereitschaft schweizerischer Reaktoren in unsere Elektrizitätserzeugung sehr erwünscht.

Im Diagramm des Bildes 1 ist in schematisierter Weise der Anteil angedeutet (in roter Farbe), welchen die Atomkraftwerke an der Deckung der Fehlenergie, von welcher eingangs die Rede ist, übernehmen könnten. Bei dieser Hypothese wächst der Kernenergieeinsatz stufenweise an (in 8 Etappen), beginnend mit einem ersten Leistungskraftwerk verhältnismässig bescheidener Leistung. Die gesamte installierte Leistung dürfte im 8. Jahr etwa 2000 MW betragen. Wir hoffen, dass von diesen Anlagen ein möglichst grosser Anteil mit schweizerischen Reaktoren ausgerüstet werden kann. Der mit gelber Farbe bezeichnete Fehlenergieanteil in Bild 1 ist zur Belieferung mit thermischen Kraftwerken, die Kohle oder Oel verbrauchen, vorgesehen. Diese sind zum Ausgleich der Schwankung der hydraulischen Produktionskapazität zwischen trockenen und nassen Jahren energiewirtschaftlich besser geeignet als die kapitalintensiven Atom-Kraftwerke.

Das erste Leistungskraftwerk schweizerischer Konstruktion dürfte zu Beginn des Jahres 1972/73 in Betrieb gelangen (siehe Zeitplan in Bild 1). Die Entwicklungsstudien zur Wahl eines Reaktors sind bereits in Gang und sollten gleichzeitig mit dem Betriebsbeginn des Lucenswerks ihren Abschluss gefunden haben. Es werden folgende Reaktorvarianten untersucht:

- Reaktor mit Kohlendioxyd gekühlt und mit metallischem Uran als Brennstoff. Infolge der Aehnlichkeit der Konzeption werden dieser Variante die gewonnenen praktischen Erfahrungen mit der ersten Brennstoffladung des Lucens-Reaktors zugute kommen.
- Reaktor mit Kohlendioxyd gekühlt und mit Uranoxyd als Brennstoff. Die Vorteile liegen hier in einem bes-

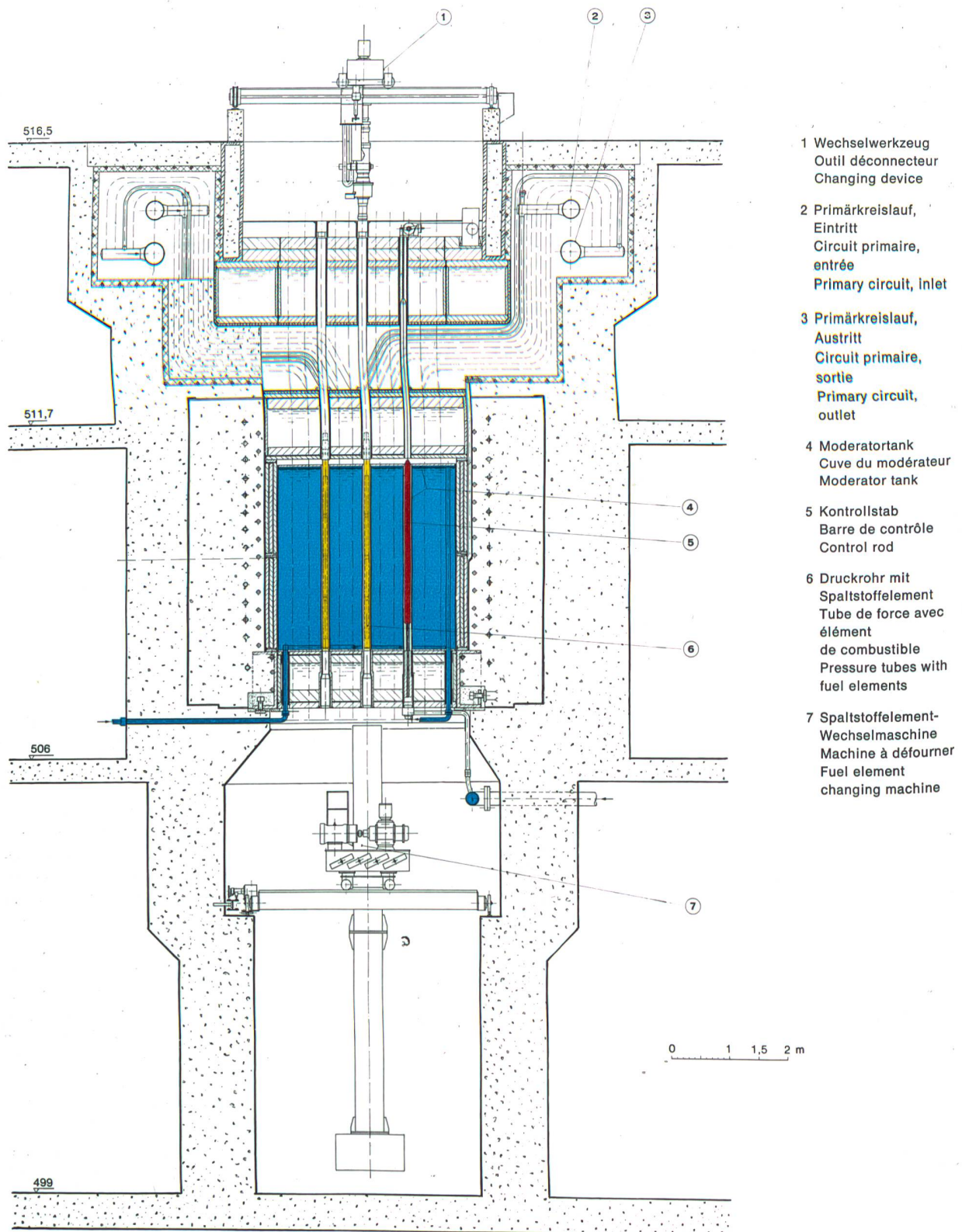


Fig. 3
Reaktorschnitt (Arbeitsgemeinschaft Lucens)
Coupe du réacteur (Communauté de travail Lucens)
Cross section of the reactor (Work community Lucens)

seren Verhalten des Brennstoffs unter Bestrahlung und in der Möglichkeit, höhere Kühlmitteltemperaturen zu erzielen, was einem höheren Nutzungsgrad des Kraftwerks entspricht.

- Reaktor mit Dampfkühlung und mit Uranoxyd als Brennstoff. Durch die direkte Verwendung des im Reaktor überhitzten Dampfes zur Speisung der Turbine dürften mit dieser Variante namhafte Einsparungen auf den Gesamtherstellungskosten der Anlage erzielt werden können. Dagegen sind die sich ergebenden Probleme, besonders hinsichtlich Korrosion, viel umfangreicher als bei Gaskühlung.

Das erste schweizerische Leistungskraftwerk und vielleicht in geringerem Mass auch das hierauf folgende werden in den Gesteungskosten noch nicht die volle Konkurrenz mit erprobten ausländischen Anlagen erreicht haben. Die zur Deckung des Konkurrenzdefizits erforderlichen Mittel sind volkswirtschaftlich betrachtet als Kaufpreis der angestrebten bestmöglichen Unabhängigkeit der Elektrizitätsversorgung anzusprechen. Es ist zu erwarten, dass im Verlauf der betrachteten Anlaufperiode des Kernereinsatzes in Bild 1 die volle Wettbewerbsfähigkeit des schweizerischen Reaktorbaus erreicht sein wird.

LA CENTRALE NUCLEAIRE DE LUCENS ET LE DEVELOPPEMENT DE LA CONSTRUCTION DE REACTEURS EN SUISSE

B. Bauer, prof., Zurich

CD. 621.311:621.039 (494)

1. INTRODUCTION

Le consommateur suisse d'électricité assiste à une modification de la structure du système de production. Durant des décennies de développement constant, c.-à-d. depuis le début de l'ère de l'électricité, la mise en valeur progressive des forces hydrauliques indigènes permit de couvrir les besoins. Mais la fin de cette opération est actuellement prévisible et les nouveaux besoins en énergie électrique devront être couverts à l'aide d'usines thermiques. Ainsi apparaît un nouvel élément préjudiciable à l'indépendance actuelle de notre production d'électricité, à savoir la dépendance de l'approvisionnement du pays à l'égard du combustible étranger.

Le diagramme de la fig. 1 permet de reconnaître immédiatement la situation à laquelle nous venons de faire allusion. Les colonnes figurant en bleu indiquent pour 16 années hydrologiques, de 1964/65 à 1979/80, le cours de la capacité de production des usines hydrauliques suisses par hydraulité moyenne. Cette présentation comprend les usines actuellement en service, de même que les installations hydrauliques en construction et projetées.* La courbe de la consommation estimée a été établie sur la base d'une augmentation annuelle de 6 %. Elle forme la limite supérieure des quantités croissantes d'énergie manquantes à couvrir par les usines thermiques (représentées en jaune et en rouge). Il est vrai que la dépendance à l'égard du combustible étranger n'est pas encore alarmante pour la période considérée à la fig. 1 (elle est plus sensible au cours des années sèches durant lesquelles on enregistre une régression de la production hydraulique à 80 % de la valeur atteinte par hydraulité moyenne).

Mais la consommation annuelle continuera évidemment à croître, peut-être plus modérément, au delà de 1979/80; la production d'énergie d'origine hydraulique, par contre, va probablement demeurer au niveau maximum prévu pour 1979/80. C'est la raison pour laquelle la production d'énergie d'origine thermique va prendre une importance considérable au cours des prochaines décades et que les mesures qui doivent être prises en vue de garantir au mieux l'approvisionnement du pays en énergie revêtent ainsi de

plus en plus le caractère d'une tâche extrêmement importante de l'économie sociale.

Les milieux intéressés au ravitaillement en énergie, de même que les autorités fédérales et cantonales étaient tous persuadés, il y a déjà plusieurs années, que l'intégration de l'énergie nucléaire serait apte, pour des raisons bien connues, à maintenir dans des limites tolérables la dépendance à l'égard du combustible étranger, à condition d'équiper les centrales nucléaires de réacteurs dont la matière fissile fasse l'objet d'un marché. On était également d'accord qu'il fallait créer une nouvelle base propre à maintenir la plus grande indépendance possible de l'approvisionnement du pays en formant une industrie suisse des réacteurs. Remarquons en passant que cette politique sert aussi les intérêts de notre industrie relatifs à l'exportation.

C'est à partir de ces considérations que l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs (IFR) a été fondé il y a 15 ans. Il appartient actuellement à l'organisation de l'Ecole polytechnique fédérale (EPF) et il est devenu peu à peu un institut central remarquable voué à la recherche en question. La garde de l'aspect industriel de la construction des réacteurs a été confiée à la Société nationale pour l'encouragement de la technique atomique industrielle (SNA), fondée en 1961 et à laquelle participent tous les milieux économiques intéressés à la formation d'une technique atomique suisse.

La SNA accomplit actuellement deux tâches principales. En qualité de maître de l'œuvre de la centrale nucléaire expérimentale de Lucens, elle est tout d'abord responsable de l'établissement des projets, de la construction et de l'expérimentation de cette usine, à quoi il importe d'ajouter que l'exécution matérielle de ces opérations est confiée à une Communauté de travail composée de firmes suisses d'ingénieurs et de constructeurs. La SNA s'est en outre chargée, par l'intermédiaire de sa Commission pour les études comparatives (CE), du prochain pas à effectuer à la suite de Lucens, la construction d'une centrale nucléaire de puissance au sujet de laquelle les questions relatives au choix du réacteur viennent en tête. Les études ont lieu en étroite collaboration avec l'IFR. Ces examens sont fécondés de manière fort utile par l'échange d'expériences entreprises par la SNA avec des groupes spécialisés étrangers. Le

*) La documentation relative à la capacité de production hydraulique a été établie par le Dr. Pedrolli du Service fédéral des eaux.

programme chronologique de ces tâches de la SNA est porté pour orientation sans engagement sur le diagramme de la fig. 1.

2. LA CENTRALE NUCLEAIRE EXPERIMENTALE DE LUCENS

Ce n'est pas ici le lieu de faire une description détaillée de toutes les parties de cette installation. L'auteur se borne

par conséquent à esquisser quelques caractéristiques de ce premier objet d'études de la construction suisse des réacteurs. Pour toutes les autres particularités, nous renvoyons le lecteur à la description détaillée de la centrale, due à P. Krafft, ing. dipl., et parue dans le Bulletin de l'Association suisse des électriciens, vol. 53 (1962), no. 13.

La première tâche consista à choisir la ligne à suivre en Suisse dans le domaine du développement des réacteurs. La SNA s'est décidée en faveur du type à eau lourde.

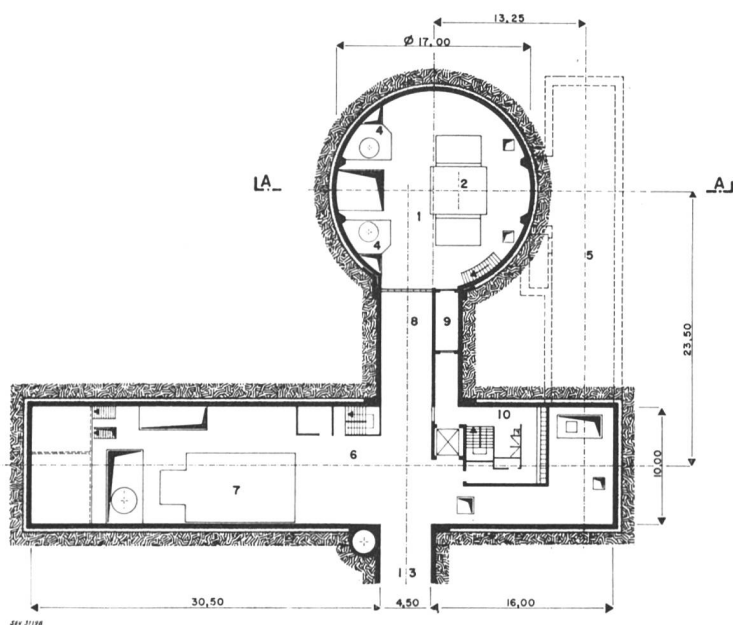


Fig. 4
Kavernengrundriss (Kote 516,50)
Coupe horizontale de la caverne (cote 516,50)
Horizontal section through the cave (level 516,50)

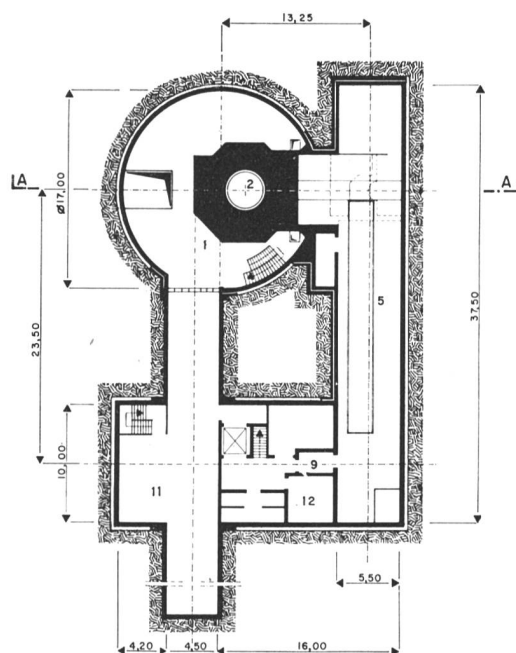


Fig. 5
Kavernengrundriss (Kote 508,30)
Coupe horizontale de la caverne (cote 508,30)
Horizontal section through the cave (level 508,30)

- 1 Reaktorkaverne – Caverne du réacteur – Reactor cave
- 2 Reaktor – Réacteur – Reactor
- 3 Wechselmaschinenraum
Local de la machine à défourner
Fuel elements changing machine room
- 4 Dampferzeuger – Générateur de vapeur – Steam generator
- 5 Stablagerkaverne
Caverne de la piscine à combustible
Cave for storing the fuel elements
- 6 Maschinenkaverne – Caverne des machines – Machine cave
- 7 Turbogenerator – Groupe turbo-alternateur – Turbine-generator set
- 8 Materialstollen – Galerie du matériel – Gallery for material
- 9 Personenschleuse – Sas pour le personnel – Sluice for the staff
- 10 Personalkontrolle
Contrôle du personnel
Checking room for the staff
- 11 Räume für elektrische Apparate
Local d'appareillage électrique
Room for the electrical switchgear
- 12 Lüftungsanlage für Stablagerkaverne
Ventilation de la caverne de la piscine
Ventilation for the fuel elements storage cave
- 13 Zugangsstollen – Galerie d'accès – Access gallery

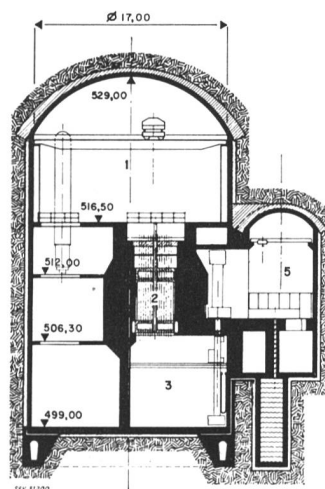
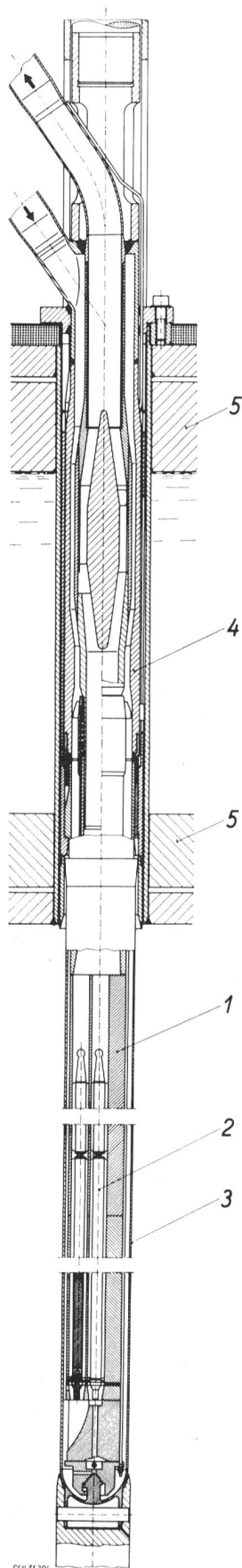
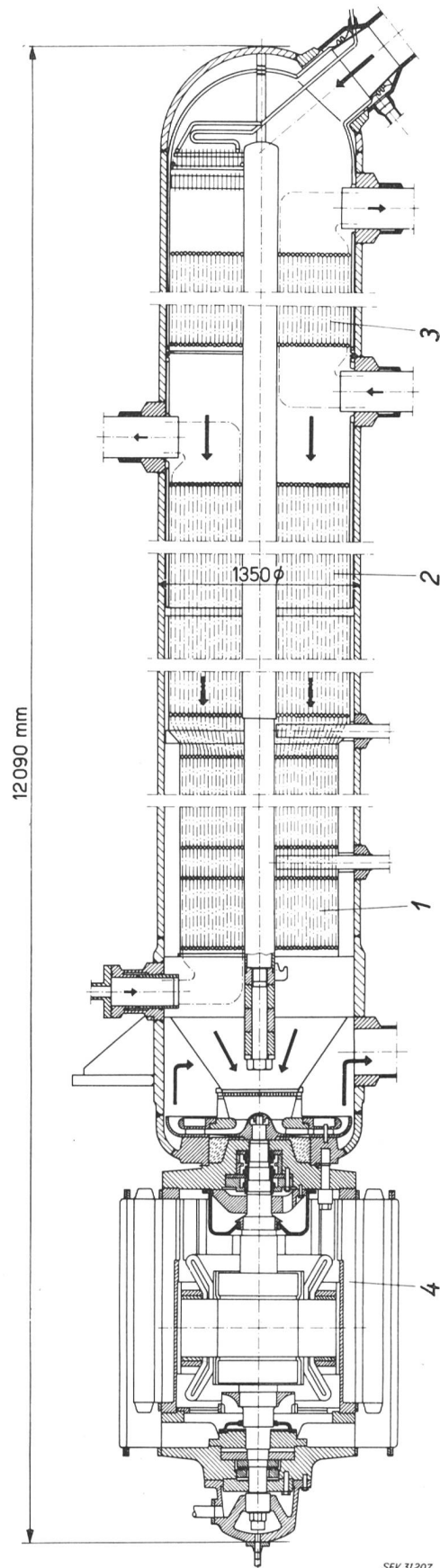


Fig. 6
Vertikalschnitt durch die Reaktorkaverne
Coupe verticale de la caverne du réacteur
Vertical section through the reactor cave



- 1 Graphitträger
Support en graphite
Graphite support
- 2 Spaltstoffsegment
Segment de combustible
Fuel segment
- 3 Druckrohr
Tube de force
Pressure tube
- 4 äusseres Kühlgasleitrohr
Conduite extérieure
External cooling gas pipe
- 5 Abschirmungsbehälter
über Moderatortank
Caisson supérieure
Shielding vessel above
moderator tank



- 1 Vorwärmer
Préchauffer
Preheater
- 2 Verdampfer
Evaporateur
Evaporator
- 3 Ueberhitzer
Surchauffeur
Superheater
- 4 Gebläse und Gebläsemotor
Soufflante et moteur
Blower with motor

Fig. 7
Spaltstoffelement
Elément de combustible
Fuel elements

Fig. 8
Dampferzeuger und Gebläse
Générateur de vapeur et soufflante
Steam generator and blower

Nous croyons que ce choix fut heureux. Cette voie ne fait pourtant pas partie de celles qui sont les plus avancées; en particulier, elle doit encore subir l'épreuve de la pratique. Par contre, les perspectives qu'elle offre à long terme sont très prometteuses. La bonne économie des neutrons assure une exploitation avantageuse du combustible; les éléments de combustible simples d'uranium naturel n'occasionnent que des frais minimes de combustible. L'utilisation d'uranium naturel ou d'uranium légèrement enrichi permet de renoncer à la récupération des matières fissiles encore disponibles dans le combustible irradié. Les perspectives de pouvoir passer par la suite au breeder thermique dans le cycle thorium sont favorables.

La conception de la centrale a été choisie en fonction du but de cette installation expérimentale. A Lucens, de nouveaux matériaux et de nouvelles constructions doivent être éprouvés sous l'angle de leur qualification dans le service continu. De même, la centrale doit servir d'école de formation aux ingénieurs spécialisés dans l'établissement des projets et aux chefs d'exploitation des futures centrales nucléaires.

La centrale de Lucens présente par rapport aux réalisations étrangères un certain nombre d'originalités.

Tout d'abord, il convient de mentionner la construction en caverne. C'est une solution bien adaptée à la Suisse. Elle présente des avantages du point de vue de la sécurité et de la protection des sites. La participation du rocher à l'enceinte de confinement, barrière qui doit empêcher tout dégagement dangereux de produits radio-actifs en cas d'accident catastrophique, a nécessité une série d'études et d'essais originaux qui ont abouti à un bon résultat. Nous ne voulons pas dire par là que la construction en caverne sera également choisie pour les autres centrales nucléaires à construire dans notre pays.

Le réacteur présente lui aussi de nombreuses caractéristiques intéressantes. Il est modéré à l'eau lourde et refroidi au gaz. Chaque élément combustible est enfermé dans un tube de force supportant la pression du réfrigérant. Ces tubes de force peuvent être démontés avec l'élément qu'ils contiennent. Il est ainsi possible d'essayer dans la même installation plusieurs combinaisons de combustible, de gainage et même de réfrigérant. Le réacteur de Lucens sera refroidi tout d'abord au gaz carbonique. Le combustible de la première charge sera de l'uranium métallique légèrement enrichi, gainé d'un alliage de magnésium.

La possibilité d'utiliser ultérieurement un refroidissement à la vapeur est prévue moyennant certaines modifications.

Grâce à la pression élevée du fluide réfrigérant qui permet une meilleure puissance spécifique, le réacteur de Lucens se trouve en bonne place dans la filière des réacteurs à uranium naturel gainés au magnésium et refroidis au gaz carbonique. L'utilisation ultérieure d'oxyde d'uranium devrait permettre de porter à 520 °C environ la température du gaz à la sortie du réacteur, ce qui conduit aux qualités de vapeur prévues pour les réacteurs à hautes températures et cela sans avoir à appliquer de nouvelles techniques. En même temps la puissance spécifique pourrait être environ doublée, au prix il est vrai d'un certain enrichissement.

La centrale est située à 2 km de la localité de Lucens, sur la rive gauche de la Broye, près de la route cantonale Lausanne-Berne.

Les figures 2, 4, 5 et 6 renseignent sur la disposition des ouvrages. Ainsi qu'il ressort de la coupe longitudinale et de la coupe verticale, les ouvrages souterrains sont répartis dans trois cavernes séparées: la caverne du réacteur, la caverne des machines et celle de la piscine à combustible. Les légendes

des figures donnent de plus amples renseignements sur l'affectation des différents ouvrages.

Il intéressera peut-être le lecteur de prendre également connaissance de quelques particularités de la construction du réacteur. Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, le réacteur de la centrale de Lucens est modéré à l'eau lourde, refroidi au gaz carbonique (CO₂) et équipé de barreaux d'uranium métallique gainés d'un alliage de magnésium.

Le modérateur est contenu dans une cuve cylindrique en aluminium; 73 tubes de 145 mm de diamètre intérieur en aluminium également sont soudés aux fonds supérieur et inférieur. Ils ménagent au travers du cœur et parallèlement à l'axe de la cuve autant d'espaces libres dans lesquelles viendront s'insérer les éléments combustibles. En outre, 12 tubes analogues, mais de diamètre plus faible, permettent le passage des barres de réglage.

La température de l'eau lourde ne dépasse pas 80 °C et elle se trouve sous une faible surpression. Dans ces conditions, l'aluminium s'impose comme matériau de construction grâce à sa bonne transparence aux neutrons.

Le système des tubes de force, du combustible et de son refroidissement est fixé à un caisson métallique disposé au-dessus de la cuve du modérateur. Ce caisson, rempli d'eau, sert en même temps d'écran contre les radiations. Il est constitué de manière analogue à la cuve du modérateur. Dans chaque tube correspondant à un élément combustible se trouve une tête de raccord à la partie inférieure de laquelle les tubes de force sont suspendus par une fixation à baïonnette. Ces tubes de force plongent dans les tubes de la cuve du modérateur, laissant un espace annulaire en atmosphère de CO₂ qui sert d'isolant thermique. A la partie supérieure des têtes de raccord aboutissent les tuyauteries de CO₂ qui relient chaque élément combustible aux collecteurs d'arrivée du gaz froid et de départ du gaz chaud. Des vannes permettent de doser individuellement le débit de réfrigérant de chaque élément combustible.

La cuve du modérateur est entourée d'écrans cylindriques en acier, disposés à l'intérieur de l'écran biologique formé d'une paroi de béton d'environ 2,8 m d'épaisseur. Vers le bas, un caisson inférieur protège contre les radiations le local de la machine à défourner. La cuve du modérateur repose sur le caisson inférieur, et l'ensemble est construit de manière à pouvoir descendre la cuve dans le local de la machine à défourner pour permettre d'éventuelles réparations.

Le local de la machine à défourner n'est pas accessible pendant la marche du réacteur. Par contre, le plancher supérieur doit pouvoir être accessible pour un temps limité. C'est la raison pour laquelle un écran supplémentaire est disposé au-dessus des tuyauteries de distribution du CO₂. Sur ce plancher est disposé l'outil déconnecteur destiné à manœuvrer les fixations à baïonnette attachant les tubes de force aux têtes de raccord. On y trouve également les treuils de manœuvre des barres de réglage.

Le local de la machine à défourner, les espaces entre les écrans en acier et l'écran biologique et le local des tuyauteries de distribution communiquent et sont en atmosphère de CO₂ stagnant en légère surpression pour empêcher toute entrée d'air. En service, la température de la chambre inférieure est d'environ 50 °C, celle de la chambre des tuyauteries de distribution atteint 300 °C.

Une des caractéristiques les plus originales du réacteur de Lucens est constituée par ses tubes de force démontables. Ils forment avec l'élément combustible qu'ils contiennent une unité qui est défournée d'un bloc. Cette solution donne au réacteur sa flexibilité, il est en effet possible d'utiliser, même simultanément, des éléments de différents types.

Les tubes de force supportent la pression du réfrigérant, qui est en moyenne de 60 ata. Ils sont balayés intérieurement par le CO₂ «froid» entrant dans l'élément à une température nominale de 220 °C. Le seul matériau offrant une résistance mécanique suffisante jointe à une bonne tenue à la corrosion et une faible absorption de neutrons est le zircaloy-2 (un alliage à base de zirconium). Les tubes de force sont fermés à leur extrémité inférieure, le réfrigérant descend le long des parois intérieures du tube et remonte au travers de l'élément combustible propre-

ment dit. A la jonction avec la tête de raccord, le réfrigérant circule dans deux canaux concentriques. Le joint extérieur seul est soumis à la pression totale. Un système à ressort assure une pression régulière et constante et garantit l'étanchéité de ce joint. Le joint intérieur n'est soumis qu'à la faible différence entre les pressions à l'entrée et à la sortie de l'élément.

L'élément combustible proprement dit se compose d'un support de graphite inséré dans le tube de force et verrouillé au fond par un dispositif à baïonnette. Il est percé de 7 canaux dans lesquels sont insérés 7 barreaux d'uranium. Le support sert à la fois à guider le réfrigérant et à soutenir les barreaux de combustible.

Chaque barreau de combustible est un assemblage de 2,765 m de longueur obtenu en vissant quatre segments l'un sur l'autre. Les barreaux sont solidaires du support en graphite à leur extrémité inférieure. Ils sont libres de se dilater vers le haut dans leur canal.

Les segments sont constitués par un cylindre d'uranium faiblement allié de 17 mm de diamètre et 650 mm de longueur enfermé dans une gaine étanche aux gaz de 1,75 mm d'épaisseur en alliage de magnésium. Cette gaine est munie d'ailettes destinées à améliorer le transfert de chaleur.

Les barres de réglage sont constituées par deux tubes concentriques enfermant dans l'espace annulaire qui les sépare un alliage de cadmium-argent qui est opaque aux neutrons. Elles sont refroidies à l'intérieur et à l'extérieur par un courant de CO₂. Elles sont suspendues à des câbles manœuvrés par des treuils situés sur le plancher supérieur de réacteur. Les barres sont constamment guidées dans leur mouvement. Elles sont munies d'interrupteurs de fin de course, d'indicateur de tension du câble, d'amortisseurs, etc. Il est possible de les démonter au moyen de la machine à défourner.

Les installations de manutention du combustible assurent le transport des éléments de combustible, des tubes de force et des barres de réglage de la piscine à combustible au réacteur et vice-versa. Elles doivent satisfaire à de nombreuses exigences, en particulier pour le déchargement d'éléments irradiés.

Les éléments de combustible irradiés sont fortement radioactifs. Il faut donc prévoir des écrans et des commandes à distance pour assurer la protection du personnel. En outre, ces éléments dégagent une certaine chaleur résiduelle, il n'est donc pas possible de les laisser plus d'un certain temps sans refroidissement.

Enfin, les éléments pouvant dégager des gaz radioactifs en cas de défaut de gainage, il faut sceller leur tube de force avant de les introduire dans le local de la piscine.

Avant de pouvoir procéder au défournement, il faut réduire au niveau atmosphérique la pression du circuit de refroidissement du réacteur. Cet abaissement n'est possible que plusieurs heures après l'arrêt du réacteur, lorsque le dégagement de chaleur retardée a diminué à un point tel que le débit réduit des soufflantes suffit au refroidissement du cœur.

Pour l'opération de défournement proprement dite, l'outil déconnecteur, situé sur le plancher supérieur du réacteur, et la machine à défourner, située sous le réacteur, sont placés au droit de l'élément à défourner. L'élévateur de la machine à défourner vient saisir la base du tube de force. Il est alors possible, au moyen de l'outil déconnecteur, de déconnecter la tête de raccord à laquelle le tube de force est suspendu. L'élévateur de la machine à défourner abaisse le tube de force et l'élément qu'il contient, tandis qu'au moyen de l'outil déconnecteur, on adapte un couvercle à la tête de raccord pour refermer le circuit de refroidissement du réacteur. La machine à défourner se dé-

Zukünftige Ansicht der äusseren Bauten des Atomkraftwerkes Lucens
Future view des bâtiments extérieurs de la centrale nucléaire de Lucens
Future view of the exterior buildings of the Lucens nuclear power station

(Copyright Photopress Zürich)



place au droit de l'orifice de restitution, fermé par une vanne qui obture normalement cet orifice et assure l'étanchéité entre le local de la machine à défourner et la caverne de la piscine.

La machine à défourner n'est pas blindée, l'accès à son local n'est pas possible lorsqu'elle contient un élément irradié. Elle est commandée à distance à partir d'un pupitre de commande situé dans la caverne de la piscine.

Dans ce local se trouve une hotte de transfert comportant un fort blindage en plomb. Celle-ci vient se placer au-dessus de la vanne de transfert. Celle-ci est ouverte et le treuil de la hotte descend un grappin qui saisit le tube de force et le hisse dans la hotte. La hotte se déplace ensuite jusqu'au-dessus du puits d'immersion dominant la piscine à combustible. On peut alors descendre le tube de force et son élément combustible.

Rappelons encore pour terminer la construction d'un nouveau genre du générateur de vapeur (fig. 8).

Le circuit primaire est entièrement soudé, à l'exception de l'assemblage par flasque des soufflantes aux générateurs de vapeur. L'entraînement des soufflantes est assuré par des moteurs asynchrones à 6 kV et 3000 tours/minute. En cas de perte de tension du réseau 6 kV, des enroulements auxiliaires à 380 V continuent d'entraîner les soufflantes à 750 tours/minute. Les générateurs de vapeur sont disposés au-dessus du réacteur si bien que dans le cas, fort improbable, d'une interruption totale de l'alimentation électrique, une circulation naturelle s'établira. Elle suffira à évacuer vers le circuit de refroidissement de secours la chaleur résiduelle du réacteur arrêté.

Les générateurs de vapeur sont à circulation forcée avec séparateurs d'eau centrifuges entre l'évaporateur et le surchauffeur. Le fluide secondaire (eau-vapeur) circule de bas en haut dans des tubes lisses disposés en hélice. Le CO₂ circule en contre-courant de haut en bas.

Les soufflantes radiales à un étage sont munies d'un joint mécanique à deux chambres, le fluide de barrage étant de l'eau.

La vapeur vive est produite à 370 °C sous 21,5 ata. Le circuit secondaire est toutefois dimensionné pour 500 °C et 60 ata, en vue de l'utilisation éventuelle à l'avenir d'éléments combustibles supportant une température plus élevée. Pour limiter le coût de l'installation, un cycle thermique extrêmement simple a été adopté au détriment du rendement thermodynamique. Il est évident qu'une installation de plus grande puissance serait beaucoup plus poussée de ce côté.

La turbine est une unité à action de conception classique. Elle délivre 8,55 MW à 3000 tours/minute. Elle comporte des joints d'étanchéité spéciaux sans fuites. Si le réacteur devait ultérieurement être refroidi à la vapeur, il serait ainsi possible d'utiliser directement dans la turbine la vapeur du circuit primaire.

Au sujet des mesures prises pour assurer la sécurité nucléaire, il convient de préciser ce qui suit.

Lors du fonctionnement normal des installations, il ne saurait y avoir de danger pour la population du voisinage. Les effluents gazeux et liquides de la centrale sont surveillés en permanence et un contrôle minutieux garantit qu'ils ne peuvent être relâchés que dans des conditions de sécurité absolue. Des prescriptions d'exploitation impératives imposées à un personnel spécialement formé garantissent la sécurité d'exploitation. Le personnel autorisé à pénétrer dans les installations souterraines ou qui peut entrer en contact avec de la radio-activité est soumis au strict contrôle du service de santé de la centrale. Le dédoublement ou la multiplication des principaux organes de contrôle, l'adoption d'un système d'alarme et de sécurité extensif et la sécurité intrinsèque de l'installation réduisent au minimum la probabilité d'un accident sérieux. Par ailleurs, la disposition souterraine de la centrale garantit la meilleure protection de la population du voisinage ainsi que du personnel d'exploitation, même dans le cas de l'accident hypothétique maximum défini comme l'enveloppe des accidents les plus graves que l'on puisse concevoir.

La caverne du réacteur est séparée de l'extérieur par l'enceinte de confinement. Les parois de la caverne du réacteur sont construites de manière à assurer une bonne étanchéité. Elles sont calculées pour résister à la pression maximum qu'engendrerait l'accident hypothétique maximum.

La caverne du réacteur et les autres ouvrages souterrains sont munis de systèmes de drainage séparés. Les eaux de draina-

ge recueillies ces systèmes sont envoyées à l'installation de traitement des déchets.

Tous les accès à la caverne du réacteur sont normalement fermés par des sas et des portes blindées étanches et résistant à la pression. Les spécifications d'étanchéité des sas ainsi que des pénétrations des câbles et des conduites reliant la caverne du réacteur à celle des machines sont telles que la ventilation directe de la caverne des machines et de la galerie d'accès reste possible sans risque de contamination, même en cas d'accident grave.

La surpression qui apparaîtrait dans la caverne du réacteur lors d'un tel accident décroîtrait d'abord très rapidement par refroidissement du mélange d'air, de CO₂ et de vapeur dégagée dans la caverne. La surpression subsistant dans la caverne serait ensuite réduite par l'ouverture de vannes munies de filtres qui relâcheraient les gaz de la caverne dans le système de drainage et de là dans les porosités du rocher où ils resteraient enfermés.

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

Réacteur

Type	réacteur à tubes de force
Modérateur	eau lourde (D ₂ O)
Agent de refroidissement	gaz carbonique (CO ₂)
Combustible	uranium métallique enrichi à environ 0,93 %
Charge de combustible	5,64 t d'uranium
Nombre d'éléments de combustible	73
Puissance thermique nominale	30 MW
Flux de neutrons thermiques maximum dans l'élément central	$3,2 \cdot 10^{13}$ neutrons/cm ² s

Circuit primaire

Pression moyenne	60 ata
Température à l'entrée des éléments	220 °C
Température à la sortie des éléments	385 °C

Circuit secondaire

Débit de vapeur vive	39,6 t/h
Pression de la vapeur vive	21,5 ata
Température de la vapeur vive	370 °C
Température de l'eau d'alimentation	147 °C
Puissance à l'arbre de la turbine	<u>8,55 MW</u>

Installations électriques

Turbo-alternateur triphasé	13 MVA, 6 kV, 50 Hz
Transformateur de ligne	10 MVA, 6/60 kV

3. LE DEVELOPPEMENT ULTERIEUR DE LA CONSTRUCTION SUISSE DE REACTEURS

La centrale nucléaire expérimentale de Lucens représente dans la marche du développement suisse des réacteurs le terme d'une première étape fondamentale. Les expériences à acquérir à l'aide de cette installation en vue du développement ultérieur seront précieuses mais ne suffiront pas à atteindre la pleine capacité de concurrence de nos réacteurs sur le marché mondial. Comme dans d'autres pays industriels en train de développer la mise à profit de l'énergie nucléaire, nous ne pouvons nous aussi atteindre ce but en Suisse qu'à l'aide de résultats sans cesse améliorés dans le domaine de l'exploitation de nouvelles centrales nucléaires de construction indigène, chaque nouveau pas devant être préparé par des études comparatives orientées dans ce sens. Les résultats visés au cours de l'exploitation d'essai à Lucens fourniront également leur contribution à cette conquête progressive.

Le but de la construction suisse de réacteurs a deux aspects: d'une part le maintien et l'extension de notre po-

tentiel d'exportation, de l'autre la dotation des centrales nucléaires suisses de réacteurs compétitifs et adaptés à nos conditions de production. Etant donné qu'en intégrant l'énergie nucléaire dans le domaine de la production d'électricité nous serons de toute façon réduits à nous procurer les matières fissiles à l'étranger, les consommateurs d'énergie électrique espèrent que cette dépendance ne sera pas, dans la mesure du possible, encore augmentée du fait que les producteurs deviendraient également dépendants de fournisseurs étrangers pour la partie essentielle des centrales atomiques, le réacteur et ses accessoires nucléaires, d'autant plus que, dans ce cas, le degré d'enrichissement de la matière fissile (uranium) serait aussi fixé à l'étranger. Considérée de ce point de vue, la disponibilité prochaine de réacteurs suisses dans le domaine de notre production d'électricité est hautement souhaitable.

La part que pourraient prendre les centrales nucléaires à la couverture de l'énergie manquante, à laquelle il a été fait allusion dans l'introduction, est indiquée de manière schématique et en rouge dans le diagramme de la fig. 1. Dans cette hypothèse, l'incorporation de l'énergie nucléaire croît graduellement (en 8 étapes), en commençant par une première centrale de puissance relativement modeste. La puissance installée globale devrait pouvoir atteindre 2000 MW environ la 8^e année. Nous espérons que le plus grand nombre possible de ces installations pourront être équipées de réacteurs suisses. Il est prévu de couvrir la part d'énergie manquante notée en jaune à la fig. 1 à l'aide de centrales thermiques exploitées au charbon ou au mazout. Du point de vue de l'économie énergétique, ces centrales sont, grâce à l'investissement spécifique moins élevé, plus aptes que les centrales nucléaires à compenser les fluctuations de la capacité de production hydraulique entre années sèches et humides.

La première centrale de puissance de construction suisse devrait pouvoir être mise en service au début de l'année 1972/73 (voir plan chronologique à la fig. 1). Les études

comparatives relatives au choix de son réacteur sont en cours et devraient être achevées à la date de la mise en service de la centrale de Lucens. Les variantes de réacteurs examinées sont les suivantes:

- Réacteur refroidi au gaz carbonique et utilisant l'uranium métallique comme combustible. Par suite de la similitude de la conception, les expériences pratiques acquises avec la première charge de combustible du réacteur de Lucens profiteront à cette variante.
- Réacteur refroidi au gaz carbonique et utilisant l'oxyde d'uranium comme combustible. Les avantages résident ici dans le meilleur comportement du combustible irradié et dans la possibilité d'obtenir des températures plus élevées de l'agent de refroidissement, ce qui correspond à un rendement d'exploitation supérieur de la centrale.
- Réacteur refroidi à la vapeur et utilisant l'oxyde d'uranium comme combustible. L'utilisation directe de la vapeur surchauffée dans le réacteur pour l'alimentation de la turbine devrait permettre à cette variante de réaliser de notables économies sur le prix de revient global de l'installation. Par contre, les problèmes qui en résultent, en particulier du point de vue corrosion, sont beaucoup plus vastes que ceux que pose le refroidissement au gaz.

La première centrale suisse de puissance, et peut-être aussi dans une moindre mesure la suivante, ne seront pas encore capables, en ce qui concerne le prix de revient, de soutenir pleinement la concurrence d'installations étrangères éprouvées. Les moyens nécessaires à la couverture du déficit résultant de la concurrence sont à considérer, du point de vue de l'économie sociale, comme le prix de la plus grande indépendance possible recherchée en matière de ravitaillement en électricité. On peut toutefois s'attendre à ce que la pleine capacité de concurrence de la construction suisse des réacteurs soit atteinte au cours de la période initiale de l'intégration de l'énergie nucléaire considérée dans la figure 1.

THE LUCENS NUCLEAR POWER STATION AND THE FURTHER DEVELOPMENT OF THE SWISS NUCLEAR REACTOR DESIGN

Prof. Dr. B. Bauer, Zurich

(Summary)

1. INTRODUCTION

The Swiss Electric Generation System is likely to experience a change in its structure in the near future. Up till now it has been possible to cover the increasing demand for electrical energy by hydropower generation. Soon, however, the additional power required will have to be generated by thermal power stations. Consequently, the Swiss power generation will become dependent on fuel supply from foreign sources.

Graph 1 illustrates the present situation. The blue sticks indicate the probable yearly average of the hydropower production during the period from 1964—65 to 1979—80. The curve indicates the probable demand during the same period, and it has been calculated under the assumption that the increase in demand will be 6% a year. This curve also indicates how much energy there must be produced by thermal generation, and hence how far reaching our dependence on foreign fuel supply will be.

It is clear that the demand will increase further during the period after 1979—80, whereas the hydropower supply will remain at its level of 1979—80. Thermal power generation will therefore become more and more important in the

coming decades, and the realization of this work will be an economic problem of great importance.

All interested circles as well as the government agree that the nuclear power generation will keep our dependence on foreign fuel supply on an acceptable level, on the condition that the type of reactor chosen allows the use of fuel elements readily available on the market. They also agree that the development of a national reactor-manufacturing industry will reduce our dependence even further, and possibly boost our exports.

These were the reasons for the creation of the Federal Institute for the Research on Reactor Matters (EIR) 15 years ago, which is now under the control of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH). The industrial development of nuclear reactors has been entrusted to the National Company for the Development of Industrial Nuclear Technique (NGA), of which all national circles interested in nuclear technique are members.

For the time being, the NGA is working on two main projects. Firstly, the NGA is acting as the building undertaker for the prototype nuclear power station of Lucens, the

planning, the engineering and the testing of which have been entrusted to a consortium of consulting engineers and manufacturers. Secondly, the NGA is studying the next step after the Lucens scheme, i. e. the erection of an industrial nuclear power station. The main problem concerning this study is the choice of the cooling system of the heavy-water reactor being in consideration, and it is investigated in collaboration with the EIR.

2. THE PROTOTYPE NUCLEAR POWER STATION OF LUCENS

The reactor in Lucens is a heavy-water, gas-cooled reactor ensuring a good neutron economy, and allowing the use of natural uranium. The power station is built underground. The cooling gas is CO₂, the metallic fuel elements are made of slightly enriched uranium and canned with a magnesium alloy. A modification for cooling with steam at a later date is possible.

3. THE FURTHER DEVELOPMENT OF THE SWISS REACTOR DESIGN

The experiences gathered at the prototype power station of Lucens will indeed be a valuable contribution to the further development of a Swiss reactor, but not a sufficient one for ensuring its competitiveness on the world-market. This will only be possible by gathering experience from an even more advanced nuclear plant of a national design.

The development of a national reactor design has two aspects: Firstly, to boost our exports, and secondly, to provide the national market with a type of reactor which is competitive and well adapted to the power generation in our country. Nuclear power generation means dependence on foreign fuel sources. It is therefore hoped that this dependence will not be increased further by the obligation of purchasing the necessary reactors abroad, which in turn means acceptance, without possibility of discussion, of the selected grade of enrichment of the uranium to be used.

Graph 1 shows schematically how much of the difference between the demand and the hydroproduction could be taken over by nuclear power plants. Starting with a single nuclear power plant of a modest output, the total installed capacity will reach about 2000 MW within 8 years. It is hoped that most of these plants will be equipped with reactors of a Swiss design. The rest (yellow on the graph) will have to be produced by coal or oil-fired steam power plants, which are better suited for the adaption of thermal power generation to the changing hydroproduction.

The first nuclear power station of a Swiss design will probably be put into commercial operation by 1972–73. The necessary studies for the selection of a suitable reactor-type are in progress, and will be completed in 1966/67.

The following alternatives are being investigated:

- Reactor cooled with carbondioxide and fitted with fuel elements of metallic uranium. Because of the similarity in design, the early experiences gathered in Lucens will be available for this reactor design.
- Reactor cooled with carbondioxide and fitted with fuel elements of uraniumoxide. Advantages of this design: Better behaviour of the fuel elements when irradiated, a higher cooling gas temperature, resulting in a higher overall efficiency of the plant.
- Reactor cooled with steam and fitted with fuel elements of uraniumoxide. Advantages: The direct use of superheated steam in a steam turbine will result in a substantial reduction of the initial investments. On the other hand, new problems, especially that of corrosion, will require considerable investigation.

It is likely that the first Swiss nuclear power station and, to a less extent, the following stations will not be fully competitive if compared with foreign products. Economically speaking, this difference must be regarded as the price to be paid for the highest possible grade of independence of our electricity supply.

It can be anticipated, however, that full competitiveness will be reached in the course of the running-in period of the Swiss reactor design.

Graphische Mitarbeiter für dieses Heft — Travaux graphiques exécutés par nos collaborateurs — Graphical work was done by our collaborators: Serge Bruder (Zürich), Anton Mathis (Bern)

WASSER- UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Schweizerische Monatsschrift für Wasserrecht, Wasserbau, Wasserkraftnutzung, Energiewirtschaft, Gewässerschutz und Binnenschifffahrt. Offizielles Organ des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes und seiner Gruppen: Reussverband, Associazione Ticinese di Economia delle Acque, Verband Aare-Rheinwerke, Linth-Limmatverband, Rheinverband, Aargauischer Wasserwirtschaftsverband; des Schweizerischen Nationalkomitees für Grosse Talsperren, des Rhone-Rheinschiffahrtsverbandes, der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt.

COURS D'EAU ET ENERGIE

Revue mensuelle suisse traitant de la législation sur l'utilisation des eaux, des constructions hydrauliques, de la mise en valeur des forces hydrauliques, de l'économie énergétique, de la protection des cours d'eau et de la navigation fluviale. Organe officiel de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux et de ses groupes, du Comité National Suisse des Grands Barrages, de l'Association suisse pour la navigation du Rhône au Rhin et de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

HERAUSGEBER UND INHABER: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband.

REDAKTION: G. A. Töndury, dipl. Bau-Ing. ETH, Direktor des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Rütistr. 3, Baden.

Telephon (056) 2 50 69, Telegramm-Adresse: Wasserverband Baden.

VERLAG, ADMINISTRATION UND INSERTEN-ANNAHME: Guggenbühl & Huber Verlag, Hirschengraben 20, Zürich 1.

Telephon (051) 32 34 31, Postcheck-Adresse: «Wasser- und Energiewirtschaft», Nr. VIII 8092, Zürich.

Abonnement: 12 Monate Fr. 37.—, 6 Monate Fr. 19.—, für das Ausland Fr. 4.— Portozuschlag pro Jahr.

Einzelpreis Heft 9/10, September/Oktober 1964, Fr. 15.— (ab 20 Ex. Fr. 12.— ab 50 Ex. Fr. 10.—)

DRUCK: Buchdruckerei AG Baden, Rütistr. 3, Telephon (056) 2 55 04.

Nachdruck von Text und Bildern nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

La reproduction des illustrations et du text n'est autorisée qu'après approbation de la Rédaction et avec indication précise de la source.