

Bautechnik und Strahlenschutz

Am 13. und 14. Oktober 1961 fand in Karlsruhe eine Tagung „Bautechnik und Strahlenschutz“ statt, zu der der Verein Deutscher Ingenieure, Fachgruppe Bauingenieurwesen (Düsseldorf), das Deutsche Atomforum e. V. (Bonn) und die Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft mbH. (Karlsruhe) eingeladen hatten. Der Einladung waren rd. 300 Teilnehmer aus den Kreisen der Ministerien und Behörden, der Hochschulen und anderer wissenschaftlicher Institutionen und der an Bau und Betrieb von kernphysikalischen Einrichtungen interessierten Industrie – vor allem der Bauindustrie – gefolgt. Die Tagung gliederte sich in eine Vortragsveranstaltung am 1. Tage in der Stadthalle Karlsruhe und in die Besichtigung des Kernforschungszentrums Karlsruhe am 2. Tage, der ebenfalls drei einleitende Vorträge im dortigen Hörsaal vorausgingen.

Die wissenschaftliche Leitung der Vortragsveranstaltung lag in Händen des Institutsleiters für Beton und Stahlbeton an der Techn. Hochschule Karlsruhe, Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Franz, der nach Kennzeichnung der Aufgaben des Bauingenieurs die besonderen Forderungen herausstellte, die z. B. durch die Kerntechnik veranlaßt sind und die in diesem Falle nur noch gemeinsam durch Physiker und Bauingenieur zu bewältigen sind. Anschließend übermittelte der Bürgermeister von Karlsruhe den Tagungsteilnehmern Grüße und den Wunsch für einen erfolgreichen Tagungsverlauf.

Prof. Dr. O. Haxel, Heidelberg: Einführung

Im Gegensatz zum militärischen Sektor entwickelt sich auf dem zivilen Anwendungsgebiet die Ausnutzung der Kernenergie nur sehr langsam. Die Ursache liegt vor allem in den Investitionskosten, die bei Atomkraftwerken beträchtlich höher sind als bei den konventionellen Kraftwerken, so daß Elektrizität aus konventionellen Kraftwerken heute noch wesentlich billiger ist. Einen großen Teil der Investitionskosten erfordern die Sicherheitsmaßnahmen. Den größten Kostenanteil machen die Stahl- und Betonarbeiten aus.

Der Brennstoff der Atomkraftwerke ist natürliches oder mit dem Isotop U^{235} angereichertes Uran, das seine Energie bei der Spaltung freisetzt. Als Moderator – zur Steuerung des Spaltungsprozesses – wird u. a. Bor, Graphit und schweres Wasser verwendet. Als Arbeitssubstanz, die meist auch gleichzeitig das Kühlmittel darstellt und die die im Reaktor entstehende Wärme zum Wärmeaustauscher trägt, kommen Gase, z. B. CO_2 , und auch Wasser in Betracht. Von den bei der Kernspaltung auftretenden Strahlen sind wegen ihres großen Durchdringungsvermögens vor allem die γ - und Neutronenstrahlen gefährlich. Die Absorption der Strahlen verläuft in Annäherung nach der Gleichung $J_x = J_0 \cdot e^{-\mu x}$, wobei J_x die verbleibende Reststrahlung, J_0 die Ausgangsstrahlung, μ der Abschwächungskoeffi-

zient (ein Stoffkennwert) und x die Abschirmwanddicke bedeuten. Im Bereich der in einem Reaktor vorherrschenden γ -Photonenenergie nimmt μ etwa linear mit dem Raumgewicht des Stoffes zu.

Bei einer Atombombenexplosion müssen die Luftschutzbauten den Druck- und Sogwellen widerstehen und für die Insassen ausreichenden Strahlenschutz aufweisen. Die zur Aufnahme des Druckes erforderlichen Querschnittsabmessungen gewährleisten bei Ausführung in üblichem Kiessandbeton sicheren Schutz gegen die gleichzeitig auftretenden Strahlen, so daß für den Luftschutz besonderer Schwerstbeton normalerweise nicht nötig ist.

Dipl.-Ing. F. Börnke, Essen: Erfahrungen beim Bau des Kahler Reaktors

Die Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke AG haben 1958 bei Kahl am Main das erste Atomkraftwerk gebaut. Dieses kleine Versuchskraftwerk hat eine Leistung von 15 000 kW, die in einer zweiten Ausbaustufe verdoppelt werden kann. Es ist einem größeren Kohlekraftwerk benachbart. Die Gesamtplanung des Versuchskraftwerkes lag in Händen der Firma AEG, die einen Reaktortyp der amerikanischen Firma General Electric einbaute. Sämtliche Bauarbeiten wurden von der Hochtief AG ausgeführt.

Schwierigkeiten bei der Planung eines Atomkraftwerkes ergeben sich bereits bei der Standortwahl, bei der aus Sicherheitsgründen u. a. Besiedlungsdichte, klimatische Verhältnisse, Boden- und Grundwasserverhältnisse, berücksichtigt werden müssen. So wurde hier bei der Planung das „1000jährige Hochwasser“ des Mains mit Rücksicht auf eine mögliche Überschwemmungsgefahr zugrunde gelegt.

Das Reaktorherz, in dem die wärmeerzeugenden, kernphysikalischen Vorgänge stattfinden, ist in einem mehrere cm dicken, zylindrischen Reaktordruckgefäß aus Stahl untergebracht, dessen Durchmesser etwas über 2 m und dessen Höhe rd. 8 m betragen. Zwischen Reaktordruckgefäß und umgebendem Strahlenschutzschild aus mehreren m dickem Kiessandbeton ist eine Kühlung angeordnet. Auch in der dem Druckgefäß benachbarten Zone des Strahlenschutzbetons sind ein vertikales und ein horizontales Kühlschlangensystem einbetoniert, um die bei der Absorption der Kernstrahlen freiwerdende Wärme abzuführen und somit den Strahlenschutzschild vor unzulässigen Temperaturspannungen zu bewahren. Das Reaktorgefäß, der Strahlenschutzschild, ein Wärmeaustauscher und die Regeleinrichtungen sind in einem sogenannten Container untergebracht, einem ebenfalls zylindrischen, sehr großen und gasdicht verschweißten Stahlbehälter von annähernd 14 m Durchmesser und 46 m Höhe, der auf einem Caisson in einem ausbetonierten Betonschacht ruht, jedoch zur Hälfte aus dem Erdreich herausragt und der Anlage ihr typisches Aussehen gibt. Der Container ist auf den Katastrophenfall (Explosion des Druckgefäßes) bemessen und verhindert, daß dann radioaktiver Wasserdampf entweicht. Um einen ausreichenden Strahlenschutz zu gewährleisten, ist er mit einer 70 cm dicken Betonschale ummantelt.

Außer dem eigentlichen Reaktor erfordern auch die anderen Anlagen eines Atomkraftwerkes bauliche und betriebliche Sicherheitsmaßnahmen, die im konventionellen Dampfkraftwerksbau nicht erforderlich sind.

Prof. Dr.-Ing. F. Leonhardt, Stuttgart: Vom Bau des Synchrotrons in Hamburg

In Hamburg wird das erste Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) gebaut. In einem solchen Synchrotron werden Elektronen (kleinste, elektrisch negativ geladene Teilchen, die den Kern eines Atoms umkreisen) auf sehr hohe Geschwindigkeit gebracht, so daß ihre Bewegungsenergie Milliarden Elektronenvolt ($6 \cdot 10^9$ eV) entspricht. Dies geschieht in einem kreisringförmigen Kanal von 100 m Durchmesser, der von zahlreichen Elektromagneten umgeben ist. Er muß der Höhe und dem Radius nach auf Bruchteile eines Millimeters justiert sein. Kanal und Elektromagneten befinden sich in einem Ringtunnel aus Stahlbeton, der zur Temperaturkonstanz und zum Strahlenschutz über 2 m mit Erdschicht bedeckt ist. An zwei, um 90° versetzten Stellen ragen Versuchshallen tangential in die Kreisringbahn hinein. Wenn die Elektronen etwa 10 000mal die Kreisringbahn passiert haben, treten sie tangential in die Versuchshalle und stoßen dort auf die Versuchsobjekte.

Beim Bau ergaben sich weniger strahlenschutztechnische als vor allem konstruktive Probleme. Die Stellen, an denen die Versuchshallen mit einer Ecke in die Kreisbahn hineinragten, waren besonders schwierig zu gestalten, da hier keine Eckstütze gesetzt werden konnte. Dadurch ergaben sich große Kragarme, die zudem von einer Kranbahn stark belastet wurden. Zur Aufnahme der Kragmomente waren hohe Wandträger (Scheiben) mit vorgespannter Bewehrung nötig. Die Decke des Kreisringtunnels mußte an dieser Stelle wegen des Strahlenschutzes ebenfalls meterdick ausgeführt werden, da hier die Erdüberdeckung nicht aufgebracht werden konnte.

Dipl.-Ing. J. Seetzen, Hamburg: Untersuchungen über Abschirmbeton

Zur Bemessung von Strahlenschutzschilden sind physikalische Sonderkenntnisse notwendig, in die sich nach Auffassung von J. Seetzen am besten einige Bauingenieure einarbeiten sollten (wie etwa in das Gebiet der Schwingungstechnik). Die abschwächenden Eigenschaften eines Schildes können heute mit Hilfe von Elektronenrechenmaschinen hinreichend zuverlässig errechnet werden; für ein bestimmtes Objekt ist es daher einfacher und billiger, Abschirmberechnungen mit verschiedenen Zuschlagstoffen und unterschiedlicher Betonzusammensetzung durchzuführen als entsprechende Versuche.

Im wesentlichen gibt es 3 verschiedene Berechnungsverfahren: die Strahlentheorie, die Transporttheorie und die Monte-Carlo-Methode. Die Strahlentheorie geht von der Annahme aus, daß sich alle Teilchen geradlinig durch die Strahlenschutzwand bewegen; die Abschwächung errechnet sich aus der statistischen Wahr-

scheinlichkeit, mit der bei einer bestimmten Weglänge in der Wand eine abschwächende, kernphysikalische Reaktion eintritt. Im Gegensatz zur Strahlentheorie berücksichtigt die Transporttheorie auch die Streuung, d. h. Ablenkung, der Strahlen, die sich bei kernphysikalischen Reaktionen ergibt. Bei der Monte-Carlo-Methode simuliert das Elektronengehirn die Einzelvorgänge in der statistischen Häufigkeit, wie sie auch in Wirklichkeit auftreten; der einzelne Prozeß tritt jedoch zufällig auf. Hierdurch läßt sich auch die Abschirmung in der Wand gut erfassen. (Anm.: Die Monte-Carlo-Methode wird z. B. auch in der Verkehrsanalyse erfolgreich angewendet.)

Die eigentliche Schildberechnung ist mit jedem der 3 Berechnungsverfahren ein sukzessiver Vorgang; ausgehend von der Strahlenquelle wird für eine bestimmte Schilddicke die Reststrahlung und die gegebenenfalls auftretende Sekundärstrahlung ermittelt, die dann für die nächste Schildzone die Ausgangsstrahlung darstellt.

(Anmerk.: Daß solche, rein rechnerischen Verfahren ihre technischen Grenzen haben, zeigte ein Beispiel des Vortragenden. Hiernach ergab sich als wirtschaftlichste Lösung für ein bestimmtes Objekt ein Beton mit 600 kg/m^3 Zement, 240 kg/m^3 Wasser und 1900 kg/m^3 Eisenerz. Offensichtlich handelt es sich dabei um Ausgußbeton, bei dem etwa 43 Raum-% mit reinem Zementleim (Wasserzementwert 0,40) ausgefüllt werden. Wegen der hohen Hydratationswärme und wegen der relativ großen Raumänderungen von ungemagertem Zementstein können in diesem Beton Lockerungen und innere Risse auftreten. Für solche errechneten Mischungen sind daher Eignungsversuche auf jeden Fall anzuraten.)

Dr.-Ing. E. Ambach, München: Betonieren des Atommeilers München

Nach einem Überblick über die gesamten baulichen Anlagen des Forschungsreaktors in München-Garching – u. a. Reaktorkuppel (Rotationsellipsoid) von 30 m Höhe und 30 m Durchmesser als 10 cm dicke Stahlbetonschale – wurde vor allem über den Bau des Reaktorbeckens berichtet. Es ist rd. 14 m lang, rd. 6 m breit und außen etwas über 10 m hoch; die Wanddicke hängt von der Strahlenbelastung ab und reicht bis zu 1,95 m. Durch ein vertikales Schütz kann das längliche Becken in zwei etwa gleich große Teile unterteilt werden. Boden und Seitenwände derjenigen Beckenhälfte, in der der Reaktor arbeitet, sind bis auf halbe Höhe aus Schwerstbeton hergestellt, die übrigen Teile aus üblichem Kiessandbeton. Als Zuschlagstoff für den Schwerstbeton wurde Schwerspat (Baryt) mit einer Rohwichte von rd. $4,1 \text{ kp/dm}^3$ verwendet. Mit einem Zementgehalt von rd. 300 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,50 wurden eine Frischbetonrohichte von $3,61 \text{ kp/dm}^3$ und ein Ausbreitmaß von 32 cm erzielt. Die 28 Tage-Zylinderdruckfestigkeit betrug im Mittel 367 kp/cm^2 , der E-Modul rd. $310\,000 \text{ kp/cm}^2$ und die Wärmedehnzahl $20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; sie ist damit annähernd doppelt so groß wie die des üblichen Kiessandbetons. Besondere Sorgfalt erforderte die genaue Justierung der Strahlrohre und anderer Versuchseinrichtungen in der Beckenwand. Sie wurden auf Stahlträgern befestigt, die mit ein-

betoniert wurden. Das gesamte Becken wurde dann in einem Zuge in $3\frac{1}{2}$ Tagen betoniert; es waren 190 m^3 Schwerstbeton und 260 m^3 üblicher Kiessandbeton einzubauen. Die beiden Betonarten wurden ohne besondere Vorkehrung gegeneinander betoniert und die Nahtstelle besonders sorgfältig verdichtet. (Eine gute Verzahnung ist wegen der unterschiedlichen Wärmedehnzahlen sehr wichtig.) Die Strahlrohre wurden vor dem Betonieren mit einer Grobschotterpackung aus Baryt in einem Maschendrahtnetz umhüllt. Nach dem Betonieren wurde diese Schotterpackung mit einem flüssigen Zementmörtel (Barytfeinsand) verpreßt. In einem vorab durchgeführten Modellversuch ergab sich dabei eine einwandfreie Ausfüllung aller Hohlräume und eine satte Einbettung der Strahlrohre. Das Reaktorbecken war bei einer Prüfung im Alter von 7 Wochen wasserdicht.

Dipl.-Ing. H. Mende, Butzbach: Schutz gegen Wasserverseuchung durch Kernstrahlen

Den von Herrn Prof. Weiss angekündigten Vortrag hielt ein Mitarbeiter, Herr Dipl.-Ing. Mende. Eine Gefahr für eine allgemein radioaktive Wasserverseuchung stellen vor allem die radioaktiven Abwässer dar, z. B. der Kernforschungsanlagen, der Isotopeninstitute und der Krankenhäuser. Sie werden als kontaminierte Wässer bezeichnet. In einem kleinen Labor fallen in der Woche schon bis zu 5 m^3 kontaminierte Abwässer an; sie müssen von den übrigen Abwässern getrennt behandelt werden, d. h., es muß ein zweites Entwässerungssystem in einem solchen Institut vorhanden sein. Bei sehr unterschiedlicher radioaktiver Konzentration kann darüber hinaus eine weitere Aufteilung in „schwach“ und „stark radioaktiv“ zweckmäßig sein.

Kontaminierte Abwässer werden zunächst aufgefangen; bevor sie in das allgemeine Entwässerungsnetz eingeleitet werden, müssen sie bis auf eine zugelassene geringe Dosis von den radioaktiven Stoffen befreit, d. h. dekontaminiert, sein. Das einfachste Verfahren ist das Abklingenlassen dieser Isotope in Abklingbehältern. Da hierzu jedoch z. B. für das in der Medizin viel verwendete Isotop Jod^{131} bei üblicher Konzentration bereits 80 Tage erforderlich sind, müssen sehr viele solcher Behälter in einem besonderen Raum mit strahlenabschwächenden Wänden aufgestellt werden. Schwerer ist die Dekontaminierung von Abwässern mit besonders langlebigen Isotopen. Hierzu bietet sich die Reinigung des Wassers durch Ionenaustausch oder die Konzentration der radioaktiven Stoffe durch Verdampfen an. In beiden Fällen kommen die hochkonzentrierten radioaktiven Substanzen in ein besonderes Lager. Die entsprechenden Apparaturen und der auch für den Planer wichtige Platzbedarf solcher Einrichtungen wurden umrissen.

Dipl.-Ing. W. Liebig, Zweibrücken: Erfahrungen beim Bau und der Abnahme des Karlsruher Reaktors

Eine der größten Schwierigkeiten beim Bau von Reaktoren sind die für den Bauingenieur ungewohnt niedrigen Toleran-

zen, die denen des Maschinenbaus entsprechen. So durfte beim Container des Karlsruher Reaktors, einem gasdicht geschweißten, zylindrischen Stahltank von 38 m Durchmesser und annähernd gleicher Höhe, die Abweichung des Zylindermantels von seiner Achse an keiner Stelle mehr als $1/1000$ des Durchmessers (3,8 cm) betragen. Beim Bau solcher geschweißten Großbehälter (Wanddicke hier 14 mm und Dicke des Deckels 8 mm) läßt sich eine vollständige Beulfreiheit nicht erreichen; hierfür wurde eine im Stahlbau außerordentlich niedrige Toleranz: Beultiefe = 0,8% der Beullänge zugestanden; d. h. auf 1 m Länge maximal 8 mm Beultiefe.

An weiteren Beispielen, vorwiegend aus dem Gebiet des Stahlbaus, wurde erläutert, wie man sich sowohl an die Ausführung als auch an die Abnahmebedingungen dieser größtenteils erstmaligen Arbeiten durch Literaturstudium verwandter Aufgaben, durch Versuche und auch während der Ausführungen selbst herantasten konnte.

Besichtigung des Kernforschungszentrums Karlsruhe

Der Besichtigung des Kernforschungszentrums Karlsruhe gingen einleitende Referate der Herren Dr. W. Schnurr (Geschäftsführer der Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft), Baudirektor Dipl.-Ing. H. Sommer (Leiter der Gesamtplanung) und Dipl.-Ing. A. Bauer (Planung und Überwachung der Bauarbeiten des Reaktors) voraus.

Die Reaktorstation liegt etwa 9 km nördlich von Karlsruhe. Das Gelände ist rd. 140 ha groß, und zwar rd. 1,4 km lang und rd. 1 km breit. Es ist von Süden nach Norden in drei Zonen eingeteilt, nämlich eine kalte Zone (frei von radioaktiven Substanzen), eine warme und eine heiße Zone. Der Haupteingang der Station, die allseitig abgegrenzt ist, befindet sich im Süden, also in der kalten Zone. Weiter sind dort untergebracht: die Verwaltung, eine Schule für Kerntechnik, die Bibliothek und Dokumentation, die Kantine, die Hauptwerkstatt, das Fernheizwerk, das Magazin, der Bauhof, die Feuerwehr und Wache, Garagen und eine Kfz.-Werkstatt. An diese kalte Zone schließt sich die sogenannte warme Zone an, in der zahlreiche Institute bereits errichtet oder geplant sind. In den Instituten für Neutronenphysik und Reaktortechnik, für Kernverfahrenstechnik, für Radiochemie, für Strahlen- und Neutronenbiologie und für Strahlenanwendung in der Technik werden bereits umfangreiche Forschungsvorhaben durchgeführt. An die warme Zone schließt sich in nördlicher Richtung die heiße Zone an, in deren südlichem Teil der Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 steht.

Dieser Reaktor wurde in Karlsruhe konstruiert und gebaut, also nicht wie die bisher in Deutschland errichteten Reaktoren aus dem Ausland bezogen. (Ein Vorgänger, FR 1, wurde ebenfalls hier geplant, aber nicht gebaut.) FR 2 ist ein Natururan-Schwerwasser-Reaktor mit einer Leistung bis zu 12 MW. Natururan ist wesentlich billiger als das mit dem Isotop U^{235} angereicherte Uran; die abbauwürdigen Lagerstätten in der Bundesrepublik werden auf etwa 600 t geschätzt. Ein Betrieb mit Natururan ist jedoch nur bei relativ großen Reaktoren möglich.

Die Brennelemente (Natururanstäbe in einer Aluminiumhülle) sind in einem Aluminiumtank untergebracht, der mit schwerem Wasser (Deuterium) gefüllt ist, das die Kernspaltungsprozesse moderiert (steuert) und kühlt. Der Aluminiumtank ruht in einem doppelwandigen Stahltank, der mit Blei ausgefüllt ist und ein Kühlrohrsystem enthält. Den biologischen Schutz übernimmt hauptsächlich ein 2,4 m dicker Strahlenschutzschild aus Schwerbeton, der als Ausgußbeton in mehreren horizontalen Abschnitten eingebracht wurde. Die groben Zuschlagstoffe, Magnetit in der Korngröße 30/100 mm mit einer Gesteinsrohichte von 4,95 kp/dm³, wurden großenteils von Hand vorgepackt. Der Ausgußmörtel, Mischungsverhältnis (in Gewicht) von Zement zu Magnetsand 0/3 mm zu Wasser = 1 : 2,0 : 0,46, wurde in einem hochtourigen Spezialmischer aufbereitet, besaß eine Reinichte von 2,98 kp/dm³ und füllte beim Verpressen alle Hohlräume satt aus, wie an einem unter Baustellenverhältnissen vorher hergestellten Modellblock nachgewiesen wurde. Unter größeren horizontalen Einbauten wurden mehrere Verpreßstützen angeordnet, und durch systematisches Entlüften und Verpressen ein satter Anschluß ohne Wasser- oder Luftpolster erreicht. Die Frischbetonrohichte des Betons lag bei 4,07 kp/dm³, seine 40 Tage-Druckfestigkeit am 30 cm-Würfel bei 395 kp/cm². – Den Reaktor und die zugehörige Versuchshalle nimmt ein stählerner, gasdicht geschweißter Container von 38 m Durchmesser und rd. 30 m Höhe auf, der auf einem 15 m hohen Betonunterbau mit gleichem Durchmesser ruht, in dem die für den Reaktor notwendigen Betriebsräume untergebracht sind. Zum Reaktor gehören noch mehrere Kühltürme aus Stahlbeton und ein achteckiger Stahlbetonschornstein von 100 m Höhe, der in 40 m einen Wasserbehälter trägt.

Auch in der heißen Zone sind noch mehrere Institute errichtet oder geplant, so z. B. die Institute für Transurane und für heiße Chemie sowie eine Entaktivierungsanlage. Daneben ist im nördlichsten Gebiet der heißen Zone ein großer Mehrzweckreaktor geplant. Seine Wärmeleistung soll 200 MW (Versuchskraftwerk Kahl 15 MW) und seine Leistung für Forschungszwecke weitere 50 MW betragen. Als Brennstoff soll natürliches Uran und schweres Wasser als Moderator und Kühlmedium dienen. Die Kosten für diesen Reaktor werden auf 130 Mio D-Mark geschätzt.

Die Gesamtinvestition im Kernforschungszentrum Karlsruhe dürfte nach der derzeitigen Planung etwa 500 Mio DM erreichen. Heute sind dort etwa 1500 Personen beschäftigt, davon ein Drittel Akademiker, ein Drittel ist fachtechnisch ausgebildet und ein Drittel Hilfskräfte. Nach dem endgültigen Ausbau sollen 2500 Personen dort tätig sein.

G. Wischers