Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 96 (1978)
Heft: 6

Artikel: Bauliche Schutzmassnahmen
Autor: Gähler, Kurt / Fuchs, Hans
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73628

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: 09.07.2025

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

Bauliche Schutzmassnahmen

Von **Kurt Gähler** und **Hans Fuchs**, Baden

Bedeutung der Bauwerke/Baustrukturen im allgemeinen Sicherheitskonzept

Einleitend seien nochmals die allgemeinen Schutzziele eines Kernkraftwerkes, wie sie schon im ersten Artikel der Serie [1] erwähnt wurden, neu formuliert in Erinnerung gerufen:

- Verhinderung der Abgabe von grösseren als für die Umwelt zumutbaren Mengen von Radioaktivität aus kontrollierten Bereichen des Kernkraftwerkes während des Normalbetriebs oder einschränkend:
- Verminderung der Aktivitätsabgabe an die Umwelt auf ein Minimum;
- Vermeidung unnötiger Bestrahlungen des Betriebspersonals;
- Hinreichende Begrenzung der Auswirkungen auf die Umwelt bei Störfällen;
- Konstruktive und administrative Massnahmen, damit schwere Störfälle äusserst unwahrscheinlich sind oder – in der Umgangssprache ausgedrückt – nach menschlichem Ermessen nicht auftreten können.

Wie im zweiten und vierten Artikel dieser Serie [2, 3] bereits erwähnt, ist eine notwendige (aber allein nicht hinreichende) Massnahme zur Erreichung dieser Ziele die Trennung der radioaktiven Stoffe von der Umwelt durch mehrere hintereinander liegende Barrieren (Bild 1). Die *wichtigsten Barrieren* sind:

- *Kernbrennstoff (Uranoxid-Tabletten):* Das Kristallgitter hält die bei der Kernspaltung entstehenden radioaktiven Spaltprodukte zum grössten Teil zurück.
- *Hüllrohre:* Die Uranoxid-Tabletten sind in Hüllrohren aus einer Zirkon-Legierung aufgestapelt. Aus dem Uranoxid austretende (leichtflüchtige) Aktivität verbleibt innerhalb der dichtgeschweissten Hüllrohre.
- *Reaktordruckbehälter und Primärrohrleitungen (Primärkreislauf):* Der Reaktordruckbehälter ist aus Schmiedestücken (Wandstärke rund 20 cm) zusammengeschweisst; ebenso wie die Primärrohrleitungen unterliegt er den strengsten Anforderungen bezüglich Auslegung, Fabrikation und Prüfungen. Aktivitäten im Kühlwasser werden zurückgehalten.
- *Betonabschirmung:* Die Betonabschirmung besteht aus meterdicken Stahlbetonwänden um das Reaktordruckgefäss zur Abschirmung der vom Reaktorkern ausgehenden intensiven Strahlung.
- *Sicherheitsbehälter (Primär-Containment):* Der Sicherheitsbehälter umschliesst den eigentlichen nuklearen Teil der Anlage. Er ist so ausgelegt, dass er auch bei der schwersten technischen Störung, dem Bruch einer Hauptleitung im Primärkreislauf, die gesamte dabei ausströmende Dampfmenge sicher aufnehmen und zurückhalten kann. Der Sicherheitsbehälter besteht je nach Kernkraftwerkstyp aus zusammengeschweissten Stahlblechen oder stahlverkleidetem Stahlbeton oder Spannbeton.
- *Reaktorgebäude (Sekundär-Containment, Sekundärabschirmung):* Das Reaktorgebäude mit mindestens 1,2 m starken Stahlbetonwänden umschliesst den Sicherheitsbehälter und schützt ihn sowie die Sicherheitssysteme vor Einwirkungen von aussen. Im unwahrscheinlichen Fall des Bruchs einer Primärrohrleitung schützt das Reaktorgebäude die Umgebung vor der vom Sicherheitsbehälter ausgehenden Strahlung (deshalb auch «Sekundärabschirmung»).
- *Grundwasserisolierung:* Die letzte Barriere gegen den Austritt von Radioaktivität ist die geschlossene und kontrollierbare Grundwasserschutzwanne.

Ein wesentlicher Teil der aufgeführten Barrieren (Betonabschirmung, Sicherheitsbehälter, Reaktorgebäude, Grundwasserschutzwanne) können als Bauwerke oder Baustrukturen eingestuft werden. Dementsprechend werden sie dann während der Planung und Ausführung von Baufachleuten betreut. Damit hat sich eine wesentliche Aufgabe der Bauwerke/Baustrukturen im allgemeinen Sicherheitskonzept herauskristallisiert. *Die Bauwerke/Baustrukturen tragen einen wesentlichen Anteil des sogenannten Barrierenkonzeptes zum Schutz der Umgebung gegen den Austritt von unzumutbaren Mengen von Radioaktivität bzw. von Direktstrahlung.*

Wie bereits angedeutet, genügt das Barrierenkonzept allein aber nicht, um den Austritt von Radioaktivität in die Umgebung zu verhindern. Es werden deshalb weitere Schutzmassnahmen vorgesehen (Sicherheitssysteme [2]). Im Zusammenhang mit den Sicherheitssystemen ergibt sich nun die *zweite wesentliche Aufgabe der Bauwerke/Baustrukturen* im allgemeinen Sicherheitskonzept von Kernkraftwerken. Die Bauwerke/Baustrukturen dienen unter anderem dazu, die *Betriebssysteme von den Sicherheitssystemen räumlich zu trennen.* Da jedes Sicherheitssystem aus mehreren unabhängigen Teilsystemen (Redundanzen) besteht, müssen alle Teilsysteme, die dieselbe Schutzfunktion erfüllen, derart voneinander getrennt werden, dass eine gegenseitige Beeinflussung nicht möglich ist. Dies wird durch *räumlich getrennte Aufstellung der Teilsysteme* erreicht; die Trennwände und Decken müssen in der Lage sein, Auswirkungen allfälliger Störungen (z.B. Rohrbrüche, Brand usw.) auf die betroffene Redundanz zu begrenzen. *Die Bauwerke/Baustrukturen tragen also einen wesentlichen Anteil des Separationskonzeptes redundanter Sicherheitssysteme.*

Damit ist die Stellung der Bauwerke/Baustrukturen im allgemeinen Sicherheitskonzept kurz umrissen; im nächsten Abschnitt wird nun näher erläutert, wie sie den ihnen zugedachten Aufgaben gerecht werden.

Funktionsbeschreibung und Schutzziele der Bauwerke/Baustrukturen

Als trivialste Funktion der Bauwerke/Baustrukturen kann die Aufnahme der Anlagekomponenten erwähnt werden. Um gegebenenfalls Anlagekomponenten reparieren bzw. auswechseln zu können, sind die Gebäudewände und -decken mit entsprechenden Öffnungen zu versehen, die mit Abdeckplatten geschlossen werden. Im weiteren dürfen die Wände und Decken die erforderlichen Wiederholungsprüfungen an den Anlagekomponenten nicht behindern.

Die weit wichtigeren Funktionen der Bauwerke/Baustrukturen ergeben sich aus ihren Aufgaben im allgemeinen Sicherheitskonzept wie in Abschnitt 1 beschrieben. Daraus lassen sich ihre Funktionen mit der Erfüllung von zwei Schutzzielen umschreiben:

- Schutz des Betriebspersonals und der Umwelt gegen Einwirkungen von innen nach aussen;
- Schutz der Anlage gegen extreme äussere Einwirkungen.

*) Vgl. Schweiz. Bauzeitung, Heft 44 (1977), Heft 3 (1978).

Schutz des Betriebspersonals und der Umwelt gegen Einwirkungen von innen nach aussen

Die bei der Kernspaltung entstehende radioaktive Strahlung muss durch bauliche Massnahmen derart abgeschirmt bzw. zurückgehalten werden, dass sowohl das Betriebspersonal als auch die Umwelt keiner unzulässigen Strahlung ausgesetzt wird. Die Erfüllung dieses Schutzzieles führt zu entsprechend grossen Wand- und Deckendicken, die oft über den statischen Erfordernissen liegen.

Eine weitere Folge ist die räumliche Unterteilung durch Zwischenwände in Gebieten, wo sich aktivitätsführende Behälter, Apparate oder Armaturen befinden, die einer Inspektion/Wartung/Bedienung bedürfen. Auf diese Weise lässt sich eine unnötige Bestrahlung des Betriebspersonals durch benachbarte Komponenten, z.B. während der Revision einer Armatur, vermeiden.

Die erforderliche Dicke der Wände und Decken wird auch beeinflusst durch den bei «Störfällen» erforderlichen Schutz des Betriebspersonals, der Umgebung sowie der sicherheitstechnisch wichtigen Strukturen/Anlageteile. Zu den auslegungsbestimmenden Störfällen gehört auch der Bruch einer Primärkühlmittelleitung, wobei für die Auslegung der Baustrukturen von den ungünstigsten Bruchstellen ausgegangen wird. Dabei sind folgende Belastungen zu berücksichtigen:

Plötzlicher Druck- und Temperaturanstieg:

Da der Sicherheitsbehälter den Primärteil der Anlage umschliesst, entsteht innerhalb des Behälters infolge des austretenden Wasserdampfgemisches ein plötzlicher Druck- und Temperaturanstieg. Die dabei auftretenden Belastungen einschliesslich der Sekundärspannungen durch Temperaturgradienten würden vom Sicherheitsbehälter aufgenommen, ohne dass dabei die zulässige Leckage bei vollem Druck erreicht wird.

Örtliche Druckdifferenzen:

Das Innere der Sicherheitsbehälter ist oft in zahlreiche, unterschiedlich miteinander in Verbindung stehende Räume aufgeteilt (Bild 2). Nach einem Rohrbruch würde das Kühlmittel mit seinem Druckpotential zuerst in den Raum eintreten, in dem der Rohrbruch stattfand und würde darin einen schnellen Druckaufbau verursachen. Aufgrund des Überdruckes würde das dort gebildete Dampf-Luft-Wasser-Gemisch durch Öffnungen/Klappen in benachbarte Räume strömen, was verzögert auch dort zu einem Druckaufbau führen würde. Bei der Bemessung der Wände zwischen den einzelnen Räumen sind infolgedessen unterschiedliche zeitliche Druckverläufe und damit Druckdifferenzen zu berücksichtigen.

Strahlkräfte:

Sogenannte Strahlkräfte würden beim Aufprall des aus der gebrochenen Rohrleitung strahlförmig ausströmenden Kühlmittels auf feste Bauteile auftreten. Ihre Grössenordnung beläuft sich auf mehrere hundert Tonnen; sie werden mit Hilfe des Impulssatzes der Strömungsmechanik berechnet.

Reaktionskräfte:

Beim Bruch einer Rohrleitung treten durch das ausströmende Kühlmittel Reaktionskräfte und -momente an der Rohrleitung auf. Soweit wegen benachbarter sicherheitstechnisch wichtiger Ausrüstungen notwendig, werden die Bewegungen der beiden Rohrenden durch Ausschlagsicherungen (Schlaufen, Bügel, Kastenstrukturen) begrenzt, wobei die entstehenden Kräfte über sogenannte Ankerbarren in die Bauteile eingeleitet werden.

Bild 1. Barrierenkonzept am Beispiel des Reaktorgebäudes für das Kernkraftwerk Kaiseraugst

1 Kernbrennstoffe
2 Hüllrohre
3 Reaktordruckbehälter
4 Betonabschirmung
5 Sicherheitsbehälter
6 Reaktorgebäude
7 Grundwasserisolierung

Bild 2. Beispiel eines Sicherheitsbehälters mit zahlreichen Räumen als Einbauten (Schnitt durch das Reaktorgebäude des Kernkraftwerkes Gösgen)

1 Reaktorgebäude aus Eisenbeton
2 Sicherheitsbehälter aus Stahl
3 Reaktordruckbehälter
4 Dampferzeuger
5 Brennelementbecken
6 Brennelementtransfereinrichtung
7 Lademaschine
8 Druckspeicher
9 Sicherheitseinspeisepumpen
10 Nachkühlpumpen
11 Flutbehälter
12 Hubschacht

Splitterkräfte:

Als direkte Folge des Rohrbruchs können unter anderem Trümmer, Splitter oder andere Teile weggeschleudert werden. Entsprechend angeordnete Baustrukturen verhindern eine Beschädigung des Sicherheitsbehälters und der Sicherheitssysteme.

Temperaturen:

Da das Kühlmittel im Primärkreislauf eine Temperatur in der Grössenordnung von 300 °C aufweist, erwärmen sich bei einem Bruch einer Rohrleitung die Atmosphäre des Sicherheitsbehälters und die Baustrukturen. Somit werden die Bauteile durch Temperaturerhöhungen und Temperaturgradienten beansprucht. Natürlich werden auch Brüche an Sekundärleitungen betrachtet; die daraus resultierenden Belastungen sind jedoch im allgemeinen kleiner als beim Primärsystem.

Alle erwähnten Belastungen sind *zeitabhängige* Lasten, die zum Teil Lastanstiegszeiten von nur einigen Millisekunden aufweisen. Als Beispiel ist in Bild 3 ein typischer Belastungsverlauf einer Strahlkraft gezeigt.

Schutz der Anlage gegen extreme äussere Einwirkungen

Ein Freisetzen von Radioaktivität an die Umwelt ist prinzipiell auch durch Beschädigung des Barrierenkonzeptes oder der Sicherheitssysteme durch extreme Einwirkungen von aussen denkbar. Gegenüber den Lastfällen üblicher Art nehmen die extremen äusseren Einwirkungen eine Sonderstellung ein, weil einerseits die Belastungsintensität sehr hoch, andererseits die Eintretenswahrscheinlichkeit im Vergleich mit den konventionellen Lasten der Bautechnik sehr gering ist. In der Planung von Kernkraftwerken werden folgende extreme äussere Ereignisse berücksichtigt:

Erdbeben:

Grundsätzlich wird bei der Auslegung von Kernkraftwerken gegen Erdbeben zwischen *zwei Erdbebenkategorien* unterschieden, die nach amerikanischer Praxis wie folgt definiert werden:

Betriebserdbeben: Während und nach dem Betriebserdbeben sollte der Betrieb des Kernkraftwerkes möglichst ohne Störungen weitergeführt werden können. Dies ist von Bedeutung, weil nach einer solchen Naturkatastrophe eine grosse Anzahl konventioneller Kraftwerke längerfristig ausfällt, sich aber eventuell Leitungen/Schaltanlagen rasch behelfsmässig reparieren lassen. Zum Schutz und zur Rettung von Menschenleben wird aber gerade nach solchen Naturkatastrophen Elektrizität für Krankenhäuser, Rettungsmannschaften usw. gebraucht.

Es erscheint sinnvoll, die Intensität des Betriebserdbebens derart festzulegen, dass während der Betriebsdauer des Kernkraftwerkes mit dem Auftreten dieses Bebens zu rechnen ist.

Sicherheitserdbeben: Während oder nach dem Sicherheitserdbeben muss nicht der Betrieb, wohl aber die Reaktorsicherheit gewährleistet bleiben. Das heisst: der Reaktor muss sicher abgeschaltet und die Nachwärmeabfuhr gewährleistet werden oder anders ausgedrückt, die Funktion der Sicherheitssysteme und die Integrität der Barrieren müssen erhalten bleiben. Bei der Festlegung der Intensität dieses Erdbebens geht man häufig von einem maximal denkbaren Erdbeben mit einer Wiederkehrperiode von 10 000 Jahren aus.

Bild 3. Beispiel des zeitlichen Verlaufes einer Strahlkraft

Explosionen

Explosionsdruckwellen am Standort des Kernkraftwerkes sind dann zu postulieren, wenn auf den nahegelegenen Verkehrswegen (Schiene, Strasse, evtl. Fluss) explosive Stoffe häufig und in namhaften Mengen transportiert werden.

Hochwasser

Kernkraftwerke haben in der Regel wegen ihres Bedarfes an Kühlwasser ihren Standort in Küstennähe oder an grossen Flüssen. Deshalb werden der Auslegung des Werkes ein Katastrophenhochwasser und Flutwellen zugrundegelegt, wie sie beim Bruch obenliegender Stauwerke oder Dämme entstehen können.

Flugzeugabsturz

In der *Schweiz* wird ein zur Gebäudewand senkrechter Aufprall eines Verkehrsflugzeuges angenommen, wobei folgende Belastungsarten untersucht werden:

- Gesamtbeanspruchung,
- Penetrationen,
- induzierte Erschütterung,
- Brand.

Trümmerlasten

Unter Trümmerlasten sind Belastungen von Bauteilen infolge des Einsturzes anderer sicherheitstechnisch nicht relevanter Bauteile zu verstehen, die unter extremen äusseren Einwirkungen versagen können. Hier haben sich im wesentlichen zwei zu untersuchende Fälle herausgebildet, nämlich:

1. Trümmerbelastung durch einstürzende Wände, Decken usw.
2. Belastung durch Kamineinsturz (Bild 4).

Fall 1 tritt dort auf, wo ein Gesamtschutz eines Gebäudes gegen extreme äussere Einwirkungen nicht notwendig ist, sondern nur einzelne Räume gegen extreme Einwirkungen von aussen geschützt werden müssen (z.B. bei Hilfsanlagengebäuden). Dies führt natürlich dazu, dass bei Versagen der konventionell ausgelegten Bauteile des Gebäudes die zu schützenden Bereiche durch herabstürzende Trümmer belastet werden können.

Auch im Falle eines Ein- oder Umsturzes des Abluftkamins, z.B. infolge eines Aufpralls eines Flugzeugteils auf den Kamin, können Trümmer Gebäude treffen, die in der Nähe des Kamins angeordnet sind. Gebäude, die innerhalb dieser Einflusszone stehen und die sicherheitstechnisch bedeutsam sind, müssen der Einwirkung des umstürzenden Kamins widerstehen können (sofern ihre Funktion nicht auch durch räumlich getrennte Redundanzen wahrgenommen wird). Die daraus resultierenden Lasten können durchaus dieselbe Grössenordnung von Belastung erreichen, wie die des Flugzeugabsturzes.

Einwirkung Dritter

Denkbare Belastungen der Bauwerke durch *Sabotageakte* werden ebenfalls näher betrachtet. Es zeigt sich aber in der Regel, dass weniger die Wanddicken überprüft werden müssen als vielmehr die Ausführung der Verbindungen zur Aussenwelt (Tore, Türen usw.).

Erfüllung der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Bauwerke/Baustrukturen

Die Erfüllung der Schutzzielanforderungen wird mit den folgenden Schritten erreicht:

- Disposition der Gesamtanlage und der Gebäude,
- Klassierung der Gebäude,
- Entwurf der sicherheitstechnisch relevanten Bauwerke,
- Berechnung und Konstruktion,
- Qualitätssicherung.

Disposition der Gesamtanlage und der Gebäude

Die *wichtigsten Gebäude* eines Kernkraftwerks sind:

- das Reaktorgebäude mit der nuklearen Dampferzeugungsanlage,
- das Maschinenhaus mit der Turbogeneratoranlage,
- das Elektrogebäude mit Leittechnik und Warte
- das Hilfsanlagengebäude mit Abluft- und Abwasserreinigungsanlagen.

Die Disposition der Gesamtanlage ergibt sich hauptsächlich aus der funktionellen Anordnung dieser Gebäude, wird aber durch den Schutz gegen extreme Einwirkungen von aussen wesentlich mitbestimmt. Um kurze Rohrleitungen und Verbindungswege zu erhalten, wird man im allgemeinen die zentralen Gebäude der Anlage möglichst nah zusammenrücken. Für eine kompakte Lösung spricht auch, dass sich die Gebäude teilweise gegen Flugzeugabsturz und Explosionsdruckwellen abschirmen. Es ist aber meistens zweckmässig, die Gebäude voneinander durch Fugen zu trennen und unabhängig zu gründen, um schädliche gegenseitige Beeinflussungen im Erdbebenfall und Flugzeugabsturzfall zu vermeiden. Andererseits wird man Gebäude, die nicht gegen extreme Einwirkungen ausgelegt sind, von den übrigen Gebäuden abrücken, um deren Beanspruchung durch Trümmerlasten zu vermeiden. Durch örtliche Trennung von mehrfach vorhandenen Anlageteilen mit derselben Funktion kann erreicht werden, dass bei lokal beschränkten Einwirkungen wie Flugzeugabsturz, Explosion oder Brand die verbleibenden Anlageteile noch funktionstüchtig bleiben. Von dieser Möglichkeit wird in der Regel Gebrauch gemacht, und zwar für periphere Anlageteile wie Kühlwasserversorgung, Dieselgeneratoren usw. Falls nachgewiesen wird, dass durch Dezentralisierung ein genügender Schutz erreicht wird, brauchen die entsprechenden Gebäude nicht mehr gegen diesen Lastfall ausgelegt zu werden. Die Disposition einer Anlage ist deshalb *nicht zuletzt eine wirtschaftliche Optimierungsfrage unter Einhaltung der Randbedingung Sicherheit.*

Klassierung der Bauwerke

Die Klassierung der Gebäude ergibt sich aus der Sicherheitsklassierung der im Gebäude enthaltenen Ausrüstungen und bezieht sich vornehmlich auf den erforderlichen Schutzgrad gegen extreme Einwirkungen von aussen.

Die wichtigste Klassierung ist die in bezug auf Erdbeben. Man unterschiedet hier zwei Klassen oder Kategorien. Klasse I umfasst die Auslegung für *Sicherheitserdbeben* und schliesst alle Gebäude mit sicherheitstechnisch relevanten Anlageteilen ein. Dazu zählen insbesondere diejenigen, die erforderlich sind, um den Reaktor sicher abzuschalten, den Reaktor im abgeschalteten Zustand zu halten, die Nachwärme abzuführen und das unzulässige Freisetzen von Radioaktivität zu verhindern. Klasse II bedeutet eine Auslegung auf das *Betriebserdbeben* und umfasst alle Anlagen und Bauwerke, die für den Betrieb des Kernkraftwerkes nötig sind. Es ist nachzuweisen, dass ein Versagen von konventionell oder nach Klasse II ausgelegten Bauteilen unter den für Klasse I anzunehmenden Bedingungen (Sicherheitsbeben) nicht zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit der zur Klasse I gehörenden Bauwerke führt.

Bild 4. Beispiel von Bruchmechanismen eines Abluftkamins infolge Flugzeugabsturz

Die *Klassierung in bezug auf den Schutz gegen Flugzeugabsturz* basiert auf folgenden Kriterien:

- Auslegung der die massgebenden Radioaktivitätsquellen umgebenden Gebäude (Reaktorgebäude, evtl. separates Gebäude für die abgebrannten Brennelemente) auf die beim Flugzeugaufprall auftretenden Belastungen.
- Auslegung der Gebäude/Kanäle mit den Nachwärmeabfuhrsystemen (Kühlwasser, zugehörige Energieversorgung) auf die Flugzeugabsturzbelastungen *oder* örtlich getrennte Aufstellung dieser Gebäude, so dass nicht mehr als ein System vom Flugzeugabsturz betroffen werden kann.

Je nach den örtlichen Verhältnissen werden oft *Mischformen* gewählt: Schutz durch entsprechende Auslegung bei zentralen Teilen der Nachwärmeabfuhrkette (z.B. gemeinsame Pumpstation), Schutz durch örtliche Trennung bei dezentralen Teilen (z.B. Kühlwasserfassungen, Notstromversorgungsanlagen).

Bei der Klassierung der Gebäude in bezug auf Explosion gelten prinzipiell dieselben Kriterien wie für den Flugzeugabsturz. Da kleinere Explosionen bei vielen Standorten wahrscheinlicher als Flugzeugabstürze sind, werden vom Betreiber gelegentlich weitere Gebäude aus Verfügbarkeitsgründen der Anlage gegen Explosion ausgelegt.

Entwurf der sicherheitstechnisch wichtigsten Bauwerke

Auch beim Entwurf der einzelnen Gebäude stehen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Anordnung der einzelnen Baustrukturen zur Verfügung, um den inneren und äusseren Einwirkungen wirkungsvoll zu begegnen. So konnte man mit dem heute üblichen Aufbau eines Reaktorgebäudes (Sicherheitsbehälter als Schutz gegen innere und Reaktorgebäude als Schutz gegen äussere Einwirkungen) den steigenden Anforderungen in bezug auf die Einwirkungen gerecht werden. Beim Entwurf der einzelnen Gebäude sind es im wesentlichen die *Gesamtstabilität*, die *Aussenhülle* und die *Gründung*, die durch die Einwirkungen von aussen beeinflusst werden. Es kommt darauf an, die *Kipp- und Gleitsicherheit des Gesamt-*

Bild 5. Kuppelbewehrung des Kernkraftwerkes Gösgen

gebäudes zu gewährleisten. Hohe und schmale Gebäude sind im Blick auf das Umkippen am ehesten gefährdet. Hinsichtlich des Lastfalles Flugzeugabsturz sind alle kleinen Gebäude nur schwierig kipp- und gleitsicher zu gestalten. Man muss diese Gebäude sehr flach halten oder vollständig im Boden einlassen. Durch die extremen äusseren Einwirkungen erfahren die *inneren Aussteifungen hohe Beanspruchungen.* Als aussteifende Bauglieder kommen neben *schweren Rahmen* hauptsächlich *steife Scheibensysteme* zur Anwendung. Die Aussenhülle eines Gebäudes hat, wie erwähnt, den lokalen Schutz gegen Explosionsdruckwellen und besonders gegen Flugzeugabsturz zu übernehmen und muss entsprechend kräftig ausgebildet werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer *Verbunkerung* des Gebäudes. Bei der Gründung spielt die erdbebensichere Auslegung eine massgebende Rolle. Erforderlich sind *durchgehende dicke Fundamentplatten,* um ein einheitliches Verhalten der Gebäude im Erdbebenfall zu gewährleisten. Dies sind ein paar Beispiele, wie der Entwurf der Anlage zur Erfüllung der Schutzzielanforderungen der Bauwerke beitragen kann.

Berechnung und Konstruktion

Ein wesentliches Mittel zur Sicherstellung der Erfüllung der Schutzzielanforderungen an die Bauwerke/Baustrukturen sind die exakte Berechnung und saubere Konstruktion der Bauteile. Man darf wohl sagen, dass bei keiner anderen Sparte der Bautechnik so *aufwendige und verfeinerte Berechnungsverfahren* zur Anwendung gelangen, wie beim Kernkraftwerkbau. Dies beginnt schon bei der *Festlegung der extremen Lasten* (innere und äussere), die ja, wie bereits gesagt, eine sehr geringe Eintretenswahrscheinlichkeit haben. Man kann sich bei diesen Extremereignissen glücklicherweise nicht auf direkte Erfahrungswerte stützen. Deshalb müssen die Lasten durch *ausgeklügelte Berechnungsmodelle* und durch *umfangreiche Testreihen* festgelegt werden. So sind in den *USA* schon mehrere zehn Millionen Franken aufgewendet worden, um die *Containmentlasten von Siedewasserreaktoren* zu bestimmen. Zur Festlegung der zu erwartenden Erdbebenintensitäten an einem Kernkraftwerkstandort werden ausgedehnte *seismische Risikoanalysen* durchgeführt. Dies sind nur einige Beispiele – es würde den Rahmen dieses Artikels sprengen, im Detail auf die Festlegung der extremen Lasten einzugehen.

Wie schon erwähnt, sind die *extremen Belastungen zeitabhängige Lasten,* d.h. es müssen zur Ermittlung der Beanspruchung *dynamische Analysen* durchgeführt werden; bei den komplexen Bauwerken von Kernkraftwerkanlagen kann dies zu Berechnungsmodellen führen, die für einen einzigen Computerlauf bis zu Fr. 100000.– verschlingen können. Für Details der verschiedenen Berechnungen wird auf entsprechende Fachartikel verwiesen [4, 5].

Neben den sehr weit getriebenen Berechnungsverfahren wird der sauberen Konstruktion der Bauteile grosses Gewicht beigemessen. Infolge der extremen Lasten können sehr grosse *Armierungsgehalte* auftreten; insbesondere die *hohen Schubarmierungsgehalte bei Schalen und Platten* führen oft zu schwierigen konstruktiven Problemen. So hat man sich z.B. beim Kernkraftwerk Gösgen dazu entschlossen, die Aussenwände (Zylinder und Kuppel) mit schlaff verlegtem Spannstahl zu bewehren (Bild 5), die Stäbe wurden mit Gewindemuffen gestossen. Mit dieser Lösung wurden allzu grosse Bewehrungskonzentrationen verhindert. Mit den Schraubenmuffenstössen konnten Überlappungsstösse, die bei einem Stab mit 40 mm Durchmesser 2,6 m betragen hätten, vermieden werden.

Qualitätssicherung

Eine besonders wichtige Stellung in der bautechnischen Abwicklung des Kernkraftwerkbaues nimmt auch die Qualitätssicherung ein. Unter Qualitätssicherung versteht man alle geplanten und systematischen Massnahmen zum Vermeiden, Erkennen und Beheben von Mängeln, um ein dem allgemeinen Stand der Kenntnisse und gültigen Vorschriften entsprechendes Werk zu erstellen. Die Qualitätssicherung schliesst auch die Dokumentation aller Qualitätssicherungsaktivitäten und deren geordnete Archivierung ein.

Das Ziel der Qualitätssicherung ist die *Gewährleistung der Sicherheit und einer hohen betrieblichen Verfügbarkeit* des Kernkraftwerkes. Qualität wird unter anderem durch qualifiziertes Personal, gute Planung, Verwendung geeigneter Materialien und Werkzeuge, geeignete Ausführung und angemessene Überwachung erreicht.

Ein wichtiger Teil der Qualitätssicherung bildet die *Qualitätskontrolle.* Sie umfasst die Kontrollen, die notwendig sind, um die Ziele der Qualitätssicherung zu erreichen.

Die Qualitätssicherung bezieht sich auf die Planung *und* auf die Bauausführung. So werden z.B. sämtliche Berechnungen neben der konventionellen Vorgesetztenprüfung der Projektanten durch eine *unabhängige Zweitrechnung durch die Bauherrschaft oder die Beauftragten der Behörden überprüft.* Die Bauherrschaft ist verpflichtet, *auf der Baustelle eine Qualitätssicherungsorganisation* aufzuziehen. Sie besteht aus je einer Qualitätssicherungsstelle der Bauherrschaft, des Lieferkonsortiums und der Bauunternehmung. Die Qualitätssicherungsstellen dürfen hierarchisch nicht den entsprechenden Bauleitungen unterstellt sein. Sie haben die Befugnis, bei Mängeln direkt einzugreifen. Zudem wird die Qualitätssicherungsorganisation durch die Beauftragten der Behörden überwacht.

Auslegungsregeln

Beschrieb der verschiedenen Lastkombinationen

In der Praxis werden die Grundlagen der Auslegungskriterien für jedes neue Kernkraftwerk auf der Basis neuester Erfahrungen und Erkenntnisse (neuester Stand der Technik) sowie der Standortgegebenheiten besonders erarbeitet. Dabei stützt man sich insbesondere für die Auslegung von Sicherheitsbehältern auf das recht umfangreiche amerikanische Normenwerk *(ASME Boiler and Pressure Vessel Code)*. Auf die sehr komplexe Auslegungsphilosophie von Sicherheitsbehältern einzugehen, würde den Rahmen dieser Ausführungen sprengen. Die nachfolgenden Beschreibungen beschränken sich deshalb auf alle übrigen Baustrukturen eines Kernkraftwerkes. Als Beispiel sei in Bild 6 lediglich die Bauphase des Sicherheitsbehälters des Kernkraftwerks *Krsko* gezeigt.

Für die *Festigkeitsanalyse* können im wesentlichen *zwei Zustände* unterschieden werden, nämlich der Gebrauchszustand oder Betriebszustand und die sogenannten Grenzzustände (siehe auch Tabelle 1).

Im *Gebrauchszustand* werden die nachfolgend aufgezählten *Lastfälle und Lastkombinationen* berücksichtigt.

Hauptbelastungen: Lastfall H (gemäss Norm SIA 160)

Zu den Hauptbelastungen gehören:

- Eigengewicht,
- ständige Nutzlasten,
- Nutz- bzw. Verkehrslasten (inkl. dynamische Wirkungen),
- Druckunterschiede an einzelnen Gebäudeteilen während des Betriebs,
- Erddruck,
- Schneelasten,
- Rohrleitungsreaktionskräfte während des Betriebs.

Hauptbelastungen + Zusatzbelastungen: Lastfall H + Z

Zu den Zusatzbelastungen gehören:

- Windlasten,
- Brems- und Anfahrkräfte,
- Temperatureinwirkungen,
- Schwinden des Betons,
- Auflagersenkungen,
- Nutzlasten während Bau-, Montage- und Prüfzuständen.

Lastfall H + Betriebserdbeben

Zusätzlich zu den Hauptbelastungen werden die Beanspruchungen infolge des Betriebserdbebens berücksichtigt.

Lastfall H + Z + Betriebserdbeben (OBE)

Zusätzlich zu den Hauptbelastungen und Zusatzbelastungen werden die Beanspruchungen infolge des Betriebserdbebens (OBE) berücksichtigt.

Der zweite Belastungszustand, der *Grenzzustand,* wird für die sicherheitstechnisch relevanten Bauteile meist massgebend für die Bemessung der Bauteile. Man unterscheidet entsprechend den zwei Schutzzielen der Bauwerke/Baustrukturen auch zwischen zwei entsprechenden Lastfällen, nämlich:

Lastfall H + Z + innere Einwirkungen (i. E.)

Zu den inneren Einwirkungen zählen wie schon vorgängig beschrieben folgende Lasten:

- Druckdifferenzen,
- Strahlkräfte,
- Reaktionskräfte,
- Splitterkräfte,
- Temperatureinwirkungen.

Bei diesen Lastfällen wird die zeitabhängige Wirkungsweise berücksichtigt. So muss z.B. die maximale thermische Unfallbelastung nicht gleichzeitig mit den maximalen Druckdifferenzen und maximalen Strahlkräften berücksichtigt werden, da meist die maximale Temperaturbelastung erst wirksam wird, wenn die Belastungen infolge Druckdifferenzen und Strahlkräften nicht mehr wirksam sind oder aber wesentlich abgeklungen sind.

Lastfall H + Z + extreme Einwirkungen von aussen

Zu den extremen Einwirkungen von aussen zählen wie schon vorgängig beschrieben folgende Lasten:

- Sicherheitserdbeben (SSE),
- Explosion (E),
- Flugzeugabsturz (F),
- Hochwasser.

Da alle Lasten infolge extremer Einwirkungen von aussen eine *sehr geringe Eintretenswahrscheinlichkeit* aufweisen, werden sie natürlich *nie als gleichzeitig wirkend* angenommen, d.h. dass z.B. bei der Berücksichtigung des Flugzeugabsturzes nicht noch ein gleichzeitig wirkendes Sicherheitserdbeben berücksichtigt wird.

Tabelle 1. Lastkombinationstabelle

	Belastungsfall	*Betriebszustände*				*Grenzzustände*			
Belastungen	*Belastungskombination*	*H*	*H+Z*	*H+OBE*	*H+Z+OBE*	*H+Z+i.E.*	*H+Z+SSE*	*H+Z+F*	*H+Z+E*
Eigengewicht		×	×	×	×	×	×	×	×
Ständige Lasten		×	×	×	×	×	×	×	×
Nutzlasten		×	×	×	×	×	×	×	×
Temperatureinflüsse			×		×	×	×	×	×
Schwinden			×		×	×	×	×	×
Wind			×	×	×	×	×	×	×
Schnee		×	×	×	×	×	×	×	×
OBE				×	×				
Differenzdrücke						×			
Strahlkräfte						×			
Rückhaltekräfte, bei Rohrleitungs- und Komponentenauflagern, infolge Rohrbrüchen						×			
SSE						×	×		
Flugzeugabsturz								×	
Explosion									×

Bild 6. Sicherheitsbehälter des Kernkraftwerkes Krsko

Beschrieb der Bemessung und der entsprechenden Sicherheitsmargen

Die nachfolgenden Ausführungen über das Bemessungsvorgehen und die Sicherheitsmargen beziehen sich auf das *Kernkraftwerk Gösgen.*

Gebrauchszustände

Unter dieser Kategorie von Lasten sind ausschliesslich Lasten eingereiht wie sie in den Normen SIA 160, 161 und 162 aufgeführt sind. Die Sicherheitsmargen können für diese Lastfälle den Normen SIA entnommen werden. Für die Lastfälle mit Betriebserdbeben gelangt auch die Richtlinie 31 der Norm SIA 162 zur Anwendung.

Bild 7. Temperaturverlauf in der Fundamentplatte des Kernkraftwerkes Gösgen infolge Hydratation

Lastfall H. Die zulässigen Beton- bzw. Stahlspannungen wurden gemäss Art. 3.06 bzw. 3.07 der Norm SIA 162 gewählt, z.B. für Beton BH, $\beta_{w28} = 300$ kg/cm²

$\sigma_{Br} = 120$ kg/cm²
(zul. Betonrandspannung)

$\sigma_e = 2400$ kg/cm²
(zul. Stahlspannung)

Lastfall H + Z. Die zulässigen Beton- bzw. Stahlspannungen wurden gemäss Art. 3.06 bzw. 3.07 der Norm SIA 162 gewählt, z.B. für Beton BH, $\beta_{w28} = 300$ kg/cm²

$\sigma_{Br} = 150$ kg/cm²
$\sigma_e = 2800$ kg/cm²

Lastfall H + Betriebserdbeben. Die zulässigen Beton- bzw. Stahlspannungen wurden gemäss Richtlinie 31 der Norm SIA 162 um 35 Prozent bzw. 25 Prozent erhöht, z.B. für Beton BH, $\beta_{w28} = 300$ kg/cm²

$\sigma_{Br} = 160$ kg/cm²
$\sigma_e = 3000$ kg/cm²

Grenzzustände

Gegenüber den Lastfällen üblicher Art nehmen die Belastungen, die unter die Grenzzustände eingestuft werden, eine Sonderstellung ein, weil die zugehörigen Belastungsintensitäten sehr hoch, die Eintrittswahrscheinlichkeiten sehr klein sind. Die Baustoffe werden deshalb höher als sonst im Bauingenieurwesen üblich ausgenutzt. Da ja nach solchen extremen Einwirkungen ein weiteres Betreiben der Anlage u. U. nicht mehr sinnvoll erscheint (z.B. weil ohnehin grössere Teile der Anlage wiederaufgebaut/repariert werden müssten), sind z.B. beim Flugzeugabsturz örtliche plastische Verformungen zugelassen.

Lastfall H + Z + innere Einwirkungen. Die Bemessung wurde mittels *Bruchsicherheitsnachweisen* durchgeführt. Es wurde die Sicherheit gegen rechnerischen Bruch nachgewiesen. Unter rechnerischer Bruchlast ist nicht jener Belastungszustand zu verstehen, der den Bruch des Bauteils vollendet, sondern schon jene Last, unter der die auftretenden Verformungen der Gebrauchsfähigkeit des Bauteils ein Ende setzen. Als kritische Verformung für diese Gebrauchsfähigkeit wurde eine Dehnung auf der Betonzugseite von 5 Promille oder eine Stauchung auf der Druckseite von 3 Promille angesehen. Die erforderliche Sicherheit gegen den rechnerischen Bruch wurde mit $S \geqslant 1{,}3$ festgesetzt.

Die Rechenwerte für die *Streckgrenze des Stahls* bzw. die Festigkeit des Betons wurde wie folgt festgesetzt:

$\sigma_S = 4300$ kg/cm² (Stahlstreckgrenze)
$\beta_{Br} = 0{,}85\ \beta_{w28}$

Lastfall H + Z + extreme Einwirkung von aussen. Die Bemessung wurde auch für diese Grenzzustände mittels Bruchsicherheitsnachweis durchgeführt, wobei grundsätzlich dieselben Rechenwerte und Sicherheiten eingeführt wurden wie für $H + Z +$ innere Einwirkungen, ausser für den Flugzeugabsturz, wo für die Sicherheit gegen den rechnerischen Bruch wegen der sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses $S \geqslant 1{,}0$ festgesetzt wurde.

Besondere Bemessungsprobleme

Das allgemeine Bemessungskonzept wurde im voranstehenden Abschnitt kurz beschrieben; im folgenden Abschnitt sollen einige besondere Bemessungs- und Konstruktionsprobleme etwas näher beleuchtet werden.

Dynamisches Materialverhalten

Wie schon erwähnt, sind die für die Bemessung massgebenden Lasten alle dynamischer Natur. Einige erreichen ihre Lastspitzen innerhalb weniger Millisekunden. Die Materialeigenschaften und das Materialverhalten kann bei solchen Lastanstiegszeiten nicht a priori von den in der konventionellen Bautechnik üblichen Werten übernommen werden. Man hat *experimentell gesicherte Kenntnisse* über das dynamische Materialverhalten von bewehrtem Beton erarbeitet. So weiss man z.B., dass mit wachsenden Dehnungsgeschwindigkeiten einerseits die Prismenfestigkeit des Betons und die Streckgrenze von Armierungsstahl ansteigt, andererseits aber verringert sich die Betonbruchstauchung.

Der projektierende Ingenieur und die Behörden müssen jedoch bei der Planung jedes neuen Kernkraftwerkes erneut überprüfen, ob die der Berechnung zugrundegelegten Materialkennwerte dem neuesten Stand der Technik entsprechen. So wurden im Verlaufe der baulichen Planung für das Kernkraftwerk Gösgen umfangreiche Versuche durchgeführt, um das Verhalten von Stahl IIIa unter schlagartigen Beanspruchungen zu untersuchen. Der Stahl wurde für Lasten mit einer Lastanstiegszeit von 2 bis 5 Millisekunden untersucht.

Mindestbewehrung und Maximalbewehrung

Die meisten Bauteile in einem Kernkraftwerk sind *massige Bauteile* und haben oft *Dichtigkeitsanforderungen* (Reaktorgebäude) zu genügen. Die massigen Bauteile sind wegen der auftretenden *Hydratationswärme* nicht zu unterschätzenden Zwängungen ausgesetzt (Bild 7).

Die Forderung einer ausreichenden *Rissesicherung* ist daher gerechtfertigt. Bei der Festlegung der Mindestbewehrung sind zwei Kriterien zu berücksichtigen. Es soll beim Auftreten eines Risses ein gleichzeitiges Versagen der Armierung (Sprödbruch) vermieden werden, und weiter sollen die Rissbreiten beschränkt bleiben.

Das massgebende Kriterium zur Festlegung der *Maximalbewehrung* ist die Forderung einer *ausreichenden plastischen Verformbarkeit der Bauteile*, d.h. es sollen *keine überarmierten Querschnitte* vorkommen, da diese ja ein sprödes Bruchverhalten aufweisen.

Abschirmwirkung

Während die Dicke tragender Wände meist durch statische Erfordernisse bestimmt wird, kann bei gewissen Decken oder Trennwänden die erforderliche Abschirmdicke massgebend werden. Besondere Abschirmungsmassnahmen sind z.B. an Stellen erforderlich, wo grosse Rohrleitungen massive, als Abschirmung wirkende Wände durchdringen.

Wie die Ausführungen zeigen, leisten die Bauwerke/Baustrukturen eines Kernkraftwerks einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung der Sicherheitsanforderungen. Diese Tatsache bedingt eine sehr hohe Anforderung an die Berechnung, Konstruktion und Ausführung dieser Bauwerke, was wiederum hohe Ansprüche betreffend Qualifikation und Ausbildung (neuester Stand der Technik) an die planenden und ausführenden Leute stellt.

Literaturverzeichnis

[1] «Kernkraftwerke als Sicherheitsproblem.» Schweizerische Bauzeitung, Heft 44, 1977.

[2] «Sicherheitskonzepte und Sicherheitsmassnahmen.» Schweizerische Bauzeitung, Heft 44, 1977.

[3] «Sicherheitssysteme.» Schweizerische Bauzeitung, Heft 3, 1978.

[4] «Structural Analysis and Design of a Nuclear Power Plant Building for Aircraft Crash Effects.» Nuclear Engineering and Design, Volume 37, No. 2, 1976.

[5] «Proceedings of the 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.» San Francisco, California, USA, 1977.

Adresse der Verfasser: Motor-Columbus, Ingenieurunternehmung AG, Parkstr. 27, 5401 Baden.

Umschau

Leben unter «Ewigem Eis»

Forschungssaison 1977/78 in der Antarktis

Unbekannte kleine Meerestiere, die wie Miniaturbäume aussehen, fischten amerikanische Wissenschaftler in der Nähe der US-Station *McMurdo* aus Schlamm und Bodenwasser unter dickem Eis, das die Oberfläche des *Ross-Schelfmeeres* bedeckt. Die Eisdecke nimmt eine Fläche ein, die etwa der Grösse Frankreichs entspricht. Eine Forschergruppe der Universität Kalifornien tauchte bis zu 30 m tief, um die kleinen Lebewesen aus ihrer kalten Umwelt zu holen – d.h. aus Meerwasser, dessen Temperatur noch unter dem Gefrierpunkt salzfreien Wassers liegt. Die Tiere, von denen die grössten etwa 5 cm messen, wurden in Kühlbehälter gepackt, um sie in ein Laboratorium in den Vereinigten Staaten transportieren und dort eingehend untersuchen zu können.

Wie *Jere Lipps* von der *Universität Kalifornien* berichtet, wurden *zwei verschiedene Typen* dieser seltsamen Lebewesen geborgen. Die einen sehen aus wie kleine Bäume, die mit ihrem Astwerk nach Nahrung suchen. Sie leben in verhältnismässig grosser Zahl im Schlamm unter der Eisdecke. Die anderen ähneln einem Rumpf mit herabhängenden Armen. Dieser Typ scheint weniger häufig zu sein. Sie sind von graubrauner Farbe und haben weder «Augen» noch «Mund». Die Wissenschaftler können noch nicht mit Sicherheit sagen, wie sie Nahrung aufnehmen. Lipps vermutet, dass sie über ein wurzelähnliches System von «Armen» Nährstoffe absorbieren.

Erste Untersuchungsergebnisse lassen vermuten, dass es sich um *einzellige Organismen* handelt, die durch Sandkörner fest miteinander verbunden sind und so gleichzeitig geschützt werden. Zur Verwertung als Nahrung für Menschen sind sie nicht geeignet, da sie nichts Verwertbares enthalten. Lipps und seine Mitarbeiter wählten für ihre «Fangexpedition» unter dem Eis einen Platz nahe der McMurdo-Station, vom dem sie wussten, dass sich infolge der Undurchlässigkeit des Eises für Licht und somit des Fehlens von Photosyntheseprozessen dort Nahrung auf pflanzlicher Basis so gut wie gar nicht würde entwickeln können. Sollten dennoch tierische Lebewesen existieren, müssten sie dem sehr geringen Nahrungsangebot besonders angepasst sein. In weiteren Tauchexpeditionen wollen die Forscher nun herausfinden, wie diese Organismen in Dunkelheit und Kälte leben und sich vermehren.

Bohrungen im Ross-Eisschelf

Die Forschungssaison in der Antarktis begann im Oktober 1977 und dauert bis Februar 1978. Etwa 600 km von der Gruppe aus Kalifornien entfernt, 664 km südöstlich der Station McMurdo, haben amerikanische Wissenschaftler und Ingenieure zusammen mit Forschern aus *Australien*, *Dänemark*, *Neuseeland*, *Norwegen* und der *Sowjetunion* die Bohrungen im Ross-Eisschelf wieder aufgenommen. Man will die hier 420 m mächtige Eisdecke, die sich bis 800 km weit vom Kontinent aufs Meer hinaus vorgeschoben hat, durchstossen. Während die Bohrkerne gesammelt und auf Zusammensetzung physikalischer Merkmale und Alter des Eises untersucht werden, versucht man eine genügend grosse Öffnung zu schaffen, um Fernsehkameras, die verschiedensten Messinstrumente und Probenehmer ins Wasser unter der