



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Reaktorentwicklung

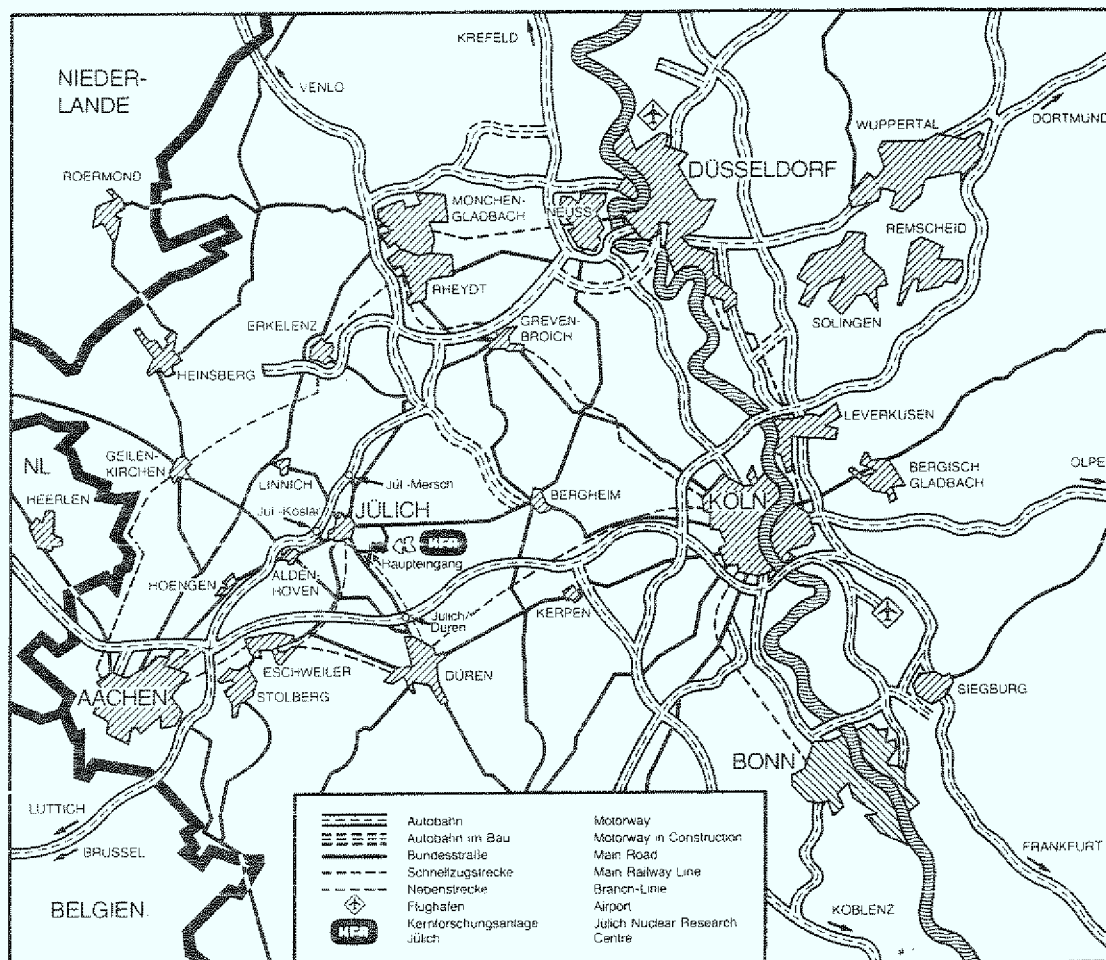
**Vergleichende Betrachtung und Entwurf
eines Sicherstellungslagers für
hochradioaktive verglaste Abfallstoffe**

**– Konstruktion, Thermodynamik, Sicherheit,
Kosten –**

von

U. Jaroni

Jül - 1969
Januar 1985
ISSN 0366-0885



Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1969

Institut für Reaktorentwicklung Jülich - 1969

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 024 61/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Vergleichende Betrachtung und Entwurf
eines Sicherstellungslagers für
hochradioaktive verglaste Abfallstoffe**

**– Konstruktion, Thermodynamik, Sicherheit,
Kosten –**

von

U. Jaroni

Comparative Consideration and Design
of a Security Depot for High Radioactive
Glass-Enclosed Materials

- Construction, Thermodynamics, Safety, Costs -

by

U. Jaroni

ABSTRACT

From the beginning of 1990 the COGEMA shall supply glass-enclosed high radioactive waste of the reprocessing of German fuel elements back to the Federal Republic of Germany. As to this time the final waste storage in the salt stock of Gorleben will not be available the glass cannisters have to be deposited above ground.

First a comparison is made out of a number of proposed storage concepts for the deposition of HAW-glass blocks. The safety technical behaviour of the facility is considered.

On the basis of the gained results a new facility design is presented, which can take 450 glass cannisters in a discoid built up cast-steel vessel and makes possible the utilization of the resulting radioactive heat of dissociation. During the development of this concept besides a compact, reasonable method of building and the thermodynamic behaviour of the storage the aspect of high security against setting free of radioactive materials was emphasized.

Vergleichende Betrachtung und Entwurf
eines Sicherstellungslagers für hochradioaktive
verglaste Abfallstoffe

- Konstruktion, Thermodynamik, Sicherheit, Kosten -

von

U. Jaroni

KURZFASSUNG

Mit Beginn des Jahres 1990 liefert die COGEMA verglasten hochradioaktiven Abfall aus der Wiederaufarbeitung deutscher Brennelemente in die Bundesrepublik Deutschland zurück. Da zu diesem Zeitpunkt das Endlager im Salzstock Gorleben noch nicht verfügbar sein wird, sind die Glaskokillen oberirdisch zu lagern.

Aus einer Anzahl vorgeschlagener Lagerkonzepte zur Einlagerung von HAW-Glasblöcken wird zunächst eine vergleichende Betrachtung vorgenommen. Besonderes Gewicht wird dabei auf das sicherheitstechnische Verhalten der Anlage gelegt.

Auf der Basis der hierbei gewonnenen Erkenntnisse wird ein neues Anlagenkonzept vorgestellt, welches 450 Glaskokillen in einem scheibenförmig aufgebauten Stahlgußbehälter aufnehmen kann und die Nutzung der entstehenden radioaktiven Zerfallswärme ermöglicht. Während der Entwicklung dieses Konzeptes stand neben der kompakten, kostengünstigen Bauweise und dem thermodynamischen Verhalten des Lagers der Aspekt einer hohen Sicherheit gegen Freisetzung von radioaktiven Stoffen im Vordergrund.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Energietechnik der Universität -Gesamthochschule- Duisburg sowie am Institut für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. R. Schulten, Direktor des Instituts für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich, danke ich für die Aufgabenstellung und für die Übernahme des Referats.

Mein Dank gilt besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Kugeler, Leiter des Fachgebiets Energietechnik an der Universität Duisburg, für die Anregung und ständige Begleitung der Arbeit, für viele weiterführende Hinweise, für seine kritischen Anmerkungen sowie für die Übernahme des Korreferats.

Ferner danke ich Herrn Dr.-Ing. P.-W. Phlippen für seine ständige Diskussionsbereitschaft und seine Unterstützung bei den thermodynamischen Berechnungen.

Ebenso möchte ich Herrn T. Dieckmann für seine Hilfsbereitschaft bei den umfangreichen Programmierarbeiten danken.

Aachen, im April 1984

Ulrich Jaroni

0. Zusammenfassung und Ergebnisse	1
1. Einführung in die Problemstellung	5
2. Lagerbedarf in der Bundesrepublik Deutschland	7
3. Lagerkonzepte für HAW-Glasblöcke	13
3.1 NUKEM-Einkreis-Blocklager zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken ..	13
3.1.1 Technischer Aufbau	13
3.1.2 Sicherheitstechnische Merkmale	17
3.1.3 Spezifische Fragestellungen zum Einkreis-Blocklager	18
3.1.3.1 Korrosion der verwendeten Stähle	18
3.1.3.2 Durchzug von Kleinlebewesen durch das Lager	20
3.1.3.3 Durchführbarkeit der Luftfilterung	22
3.1.3.4 Zündung explosibler Gemische	23
3.2 KWU-Zweikreis-Blocklager zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken ...	24
3.2.1 Technischer Aufbau	24
3.2.2 Sicherheitstechnische Merkmale	27
3.2.3 Spezifische Fragestellungen zum KWU-Zweikreis-Blocklager ..	27
3.2.3.1 Wärmerohre	27
3.2.3.2 Langzeitig erhöhte Betontemperaturen	30
3.3 Zweikreis-Sicherstellungslager der BBC mit Wärmenutzung	31
3.3.1 Technischer Aufbau	31
3.3.2 Sicherheitstechnische Merkmale	34
3.3.3 Spezifische Fragestellungen zum BBC-Zweikreis-Sicher-	
stellungslager	34
3.4 Zweikreis-Übergangslager der BBC	35
3.4.1 Technischer Aufbau	35
3.4.2 Sicherheitstechnische Merkmale	38
3.4.3 Spezifische Fragestellungen zum BBC-Zweikreis-Über-	
gangslager	38
3.5 Behälterlager zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken	39
3.5.1 Technischer Aufbau	39
3.5.2 Sicherheitstechnische Merkmale	43
3.5.3 Spezifische Fragestellungen zum Behälterlager	44
4. Anlagenbeschreibung des Übergangslagers	47
4.1 Anforderungen bei der Konzipierung des Übergangslagers	52
4.2 Wärmeerzeugende Elemente	55
4.3 Aufbau des Lagerbehälters	59
4.3.1 Beschreibung des Behälters	60
4.3.2 Der gasdichte Einschluß der Glasblöcke in den Lager-	
schächten	63

4.3.2.1 Der Lagerschachtliner	64
4.3.2.2 Das Doppeldeckelsystem	66
4.3.2.3 Das Leckkontrollsystem	68
4.3.3 Die Spannkabel zur axialen Verspannung des Lagerbehälters ..	70
4.3.4 EVI-Deckel	71
4.4 Die den Lagerbehälter umgebenden Einbauten	71
4.5 Das Betongebäude	74
5. Be- und Entladung des Lagerbehälters	75
5.1 Handhabungsablauf in der Übernahmestation	77
5.2 Handhabungsablauf bei der Einlagerung	79
5.3 Der mechanische Kannengreifer	81
5.4 Elektrischer Schaltablauf bei der Handhabung in der Über- nahmestation	83
6. Das Betriebskühlsystem zur Wärmenutzung	85
6.1 Aufbau der Einrichtungen zur Wärmenutzung	87
6.1.1 Das Behälterkühlsystem	87
6.1.2 Das Gebäudewandkühlsystem	88
6.2 Sekundäranlagen	89
6.2.1 Das Nebengebäude	89
6.2.2 Schaltplan der Wärmenutzungseinrichtungen	90
6.2.2.1 Das Sekundärkühlsystem	90
6.2.2.2 Der Behälterkühlkreislauf	92
6.2.2.3 Der Gebäudewandkühlkreislauf	93
6.2.2.4 Die Volumenausgleichsanlage	93
6.2.3 Ausfall eines Wärmeabnehmers	94
6.3 Thermodynamisches Verhalten des Übergangslagers	94
7. Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen	103
7.1 Gefährdung des Übergangslagers durch Einwirkungen von innen und außen	104
7.1.1 Einwirkungen von außen	104
7.1.1.1 Verhalten des Übergangslagers bei den Lastfällen Flugzeugabsturz und Erdbeben	107
7.1.1.2 Zündbereiche auftretender Gasgemische	112
7.1.2 Einwirkungen von innen	113
7.2 Wärmeabfuhrstörfälle	113
7.2.1 Kühlung des Übergangslagers durch Naturkonvektion nach vollständigem Ausfall der Betriebskühlung	113
7.2.1.1 Temperaturentwicklung im Übergangslager bei Naturkonvek- tionskühlung	114
7.2.2 Kühlung des Übergangslagers durch Besprühen der Lager- behälteroberfläche mit Wasser	123

7.2.2.1	Temperaturentwicklung im Übergangslager bei Besprühen der Lagerbehälteroberfläche mit Wasser	123
7.2.3	Vollständiger Ausfall aller Kühlsysteme	127
7.3	Die Spaltproduktbarrieren des Übergangslagers	127
7.4	Thermische Belastung der Spaltproduktbarrieren	129
7.4.1	Normalbetrieb	129
7.4.2	Ausfall des Betriebskühlsystems	130
7.4.2.1	Diskussion der Folgen eines Störfalles	131
7.4.2.2	Diskussion der Folgen eines Unfalles	132
7.4.2.3	Diskussion der Folgen eines hypothetischen Unfalles	132
8.	Kostenabschätzung für das Übergangslager	135
8.1	Die Betriebskosten	135
8.2	Die Investitionskosten für das Übergangslager	135
8.3	Kostenbetrachtung zur Wärmenutzung	138
8.3.1	Abnehmer der erzeugten Niedertemperaturwärme	138
8.3.2	Kostenbetrachtung zur Niedertemperaturwärmenutzung in einem Fernwärmesystem	141
9.	Einlagerung alternativer Stoffe in das Übergangslager	143
9.1	Die Einlagerung von abgebrannten LWR-Brennelementen	143
9.1.1	Das Einschlußrohr	144
9.1.2	Die Trockenlagerbüchse	145
9.1.3	Thermodynamische Berechnungen	145
9.2	Die Einlagerung von Brennelementkugeln aus AVR und THTR	149
9.3	Möglichkeiten der Einlagerung von Kalzinat	150
9.3.1	Die Kalzinateinlagerungselemente	151
9.3.2	Thermodynamische Betrachtungen	154
10.	Gegenüberstellung konkurrierender HAW-Lagerkonzepte	159
10.1	Technische Konzeption	160
10.2	Betrieb der Lager	163
10.3	Sicherheitstechnische Merkmale	165
10.4	Zur Genehmigungssituation	168
10.5	Investitionskosten	171
10.6	Allgemeines	173
11.	Verwendete Abkürzungen	175
12.	Literaturverzeichnis	177

Anhang A: Beschreibung internationaler HAW-Lagerkonzepte	1
A.1 Das französische Glasblocklager der A.V.M. in Marcoule	1
A.2 Zwischenlagerung von HAW in Großbritannien	4
A.3 Trockenlagerkonzept zur Lagerung von HAW in der Schweiz	7
A.4 Schwedisches Konzept zur Einlagerung von HAW	9
A.5 Vorschläge zur Lagerung von HAW in den USA	12
A.5.1 Dampferzeugung mit verfestigten Spaltprodukten	12
A.5.2 Dampferzeugung mit Hilfe von HAW	12
Anhang B: Erläuterungen zu den thermodynamischen Rechenpro- grammen	17
B.1 Kurzbeschreibung	17
B.1.1 THERMIX	17
B.1.2 KONVEK	19
B.1.3 LOOPY	19
B.2 Berechnungsalgorithmen	20
B.2.1 THERMIX	20
B.2.2 KONVEK	21
B.2.3 LOOPY	24
Anhang C: Berechnungsmodell zur Naturkonvektionskühlung	25
Literatur zum Anhang A	31

0. ZUSAMMENFASSUNG UND ERGEBNISSE

Ziel und Aufgabe dieser Arbeit war es, unter dem Gesichtspunkt einer langfristigen oberirdischen Lagerung das Konzept eines Übergangslagers -Sicherstellungslager- für hochradioaktive, verglaste Abfälle zu entwickeln. Dieses Lagerkonzept, dessen Kapazität dem jährlichen Lagerbedarf an HAW-Glasblöcken (High Active Waste) aus dem Betrieb von 25 GW(e) Kernkraftwerksleistung entspricht, schließt die verglasten hochradioaktiven Spaltprodukte in einer überwachbaren und wiederholungsprüfbaren technischen Anlage sicher ein. Die durch den radioaktiven Zerfall der eingeschlossenen Spaltprodukte freigesetzte Wärme -1 MW im Auslegungszustand- kann genutzt werden.

Aus einer Anzahl bestehender Lagerkonzepte -national und international- zur Einlagerung von HAW-Glasblöcken wurde zunächst eine vergleichende Betrachtung der nationalen Lagerkonzepte vorgenommen. Besonderes Gewicht wurde dabei auf das sicherheitstechnische Verhalten der Anlagen gelegt.

Das entwickelte Übergangslager besteht aus einem Stahlgußbehälter zur Aufnahme von 450 Glaskokillen und einem Betongebäude zum Schutz des Behälters gegen äußere Einwirkungen. Der Stahlgußbehälter hat einen Durchmesser von 5,85 m und eine Höhe von 20,8 m. Er ist aus 18 übereinanderliegenden, axial durch Spannkabel verspannten und an den Fugen gasdicht verschweißten Scheiben aufgebaut. Die Glaskokillen sind in 30 durch ein Doppeldeckelsystem gasdicht verschlossenen Bohrungen zu je 15 übereinandergestapelt. Jede dieser Bohrungen ist zur Abdichtung der Fugen mit einem Edelstahlrohr ausgekleidet, welches zur Verbesserung des Wärmeüberganges durch hydraulisches Aufweiten an den Behälter angelegt ist.

Der Stahlgußbehälter ist von einem zur Hälfte unterirdisch angeordneten zylindrischen Betongebäude umgeben, dessen Wände so bemessen sind, daß der Behälter gegen Einwirkungen von außen, z.B. Erdbeben, Flugzeugabsturz oder Gaswolkenexplosion, geschützt ist. Zur Inbetriebnahme des ersten Notkühlsystems -Naturkonvektion mit Umgebungsluft- ist es notwendig, die Luftführungskanäle -sie befinden sich innerhalb der Betonwand des Schutzgebäudes- mit der Umgebungsluft zu verbinden. Klappen, die sich ca. 12 m über Erdniveau im Luftsammelraum des Betongebäudes befinden, haben bis zu diesem Zeitpunkt die Luftzirkulation unterdrückt.

Für das Be- und Entladen des Lagerbehälters wurde ein Ablaufschema erstellt. Die daraus entwickelten Komponenten ermöglichen eine einfache Handhabung der Glasblöcke. Aufgrund der Konstruktionsgestaltung kann die Strahlenbelastung des Personals während des Be- und Entladevorganges niedrig gehalten werden.

Das mit vollentsalztem Wasser betriebene Betriebskühlsystem besteht aus 48, am äußeren und inneren Umfang im Stahlgußbehälter eingebauten Doppelrohrelementen, durch die ca. 70% der erzeugten Wärme abgeführt werden, sowie aus einer Gebäudewandkühlung mit ca. 27,5% Kühlleistung. Es ist dreifach redundant ausgelegt und dient zur Auskopplung der anfallenden Nachzerfallswärme. Eine in einem Nebengebäude untergebrachte Flüssig-Flüssig-Wärmetauschanlage übergibt die Wärme gegebenenfalls an ein Verbrauchernetz. Ausgehend von einer Anlagenleistung von 1 MW geht die Wärme-

produktion innerhalb von zwanzig Jahren auf 400 kW zurück. Bis dahin beträgt die kumulierte nutzbare Wärme ca. 10^8 kWh, was gleichbedeutend mit 10^7 Litern leichtem Heizöl ist.

Beim Versagen der betrieblichen Kühlung sorgen zwei unabhängige Notkühlsysteme für die sichere Abfuhr der freigesetzten Nachzerfallswärme.

- **Kühlung durch freie Konvektion mit Umgebungsluft**
Das erste Notkühlsystem arbeitet nach dem Prinzip der freien Konvektion mit aus der Umgebung angesaugter Luft. Nach dem Öffnen der Klappen -sie dienen zur Unterdrückung der Notkühlmaßnahme im Normalbetrieb- baut sich im Lagergebäude ein Konvektionskühlkreislauf auf, dessen treibende Kraft die heiße Oberfläche des Stahlgußbehälters bildet. Die durch die Öffnungen der Gebäudewand angesaugte kalte Umgebungsluft strömt durch Kanäle in der Betonwand des Schutzgebäudes zum Fundamentraum, kühlt die Auflager des Stahlgußbehälters und steigt unter ständiger Erwärmung am Behälter empor. Vom oberen Ende des Behälters wird die Luft in einem Ringkanal zur Decke des Schutzgebäudes geführt und durch Kanäle in die Umgebung zurückgeleitet.
- **Kühlung des Behälters durch Besprühen mit Wasser**
Als weitere wirksame Notkühlmaßnahme ist das Besprühen der heißen Behälteroberfläche mit Wasser vorgesehen. Hierzu sind über der gesamten Behälterhöhe, auf den U-förmigen Strömungswänden, Düsenstränge installiert, die von außen durch Anschlüsse an der Schutzgebäudewand mit Wasser gespeist werden. Die Speisung kann z.B. von Hydranten, von Tankfahrzeugen oder aus in der Nähe gelegenen Teichen erfolgen.

Das Übergangslager schließt auf relativ engem Raum ein großes Radioaktivitätsinventar ein, welches während der beabsichtigten oberirdischen Lagerzeit sicher und zuverlässig von der Biosphäre ferngehalten werden muß. Zur Gewährleistung dieser Anforderungen wurde eine Hintereinanderschaltung mehrerer Barrieren gegen den Austritt der Spaltprodukte vorgenommen. Die Barrieren sind der Glaskörper, die Edelstahlkokille des Glaskörpers, das Edelstahlrohr zur Lagerschachtabdichtung und der verschweißte Stahlgußbehälter.

Die Belastung dieser Barrieren, welche als Maß für deren Zuverlässigkeit dienen kann, ist im Normalbetrieb sehr gering. Bei Wärmeabfuhrstörungen eines frisch beladenen Übergangslagers verbleibt zur Einleitung wirksamer Notkühlmaßnahmen ein Zeitraum von mindestens 8 Tagen, bevor die Rückhaltetfähigkeit der ersten Barriere nachläßt. Aufgrund dieser langen Handlungszeiträume und der niedrigen Belastung der Barrieren besteht ein außerordentlich sicherer Einschluß der radioaktiven Abfälle.

Auf der Basis von Firmenangeboten für die wichtigsten Komponenten des Übergangslagers sowie unter Ansatz spezifischer Kosten für die übrigen Komponenten konnten die direkten Investitionskosten zu 54 Mio DM bzw. die Gesamt-Investition zu 84 Mio DM abgeschätzt werden. Legt man diese Investitionskosten auf die pro Jahr erzeugte elektrische Arbeit um, so ergibt sich eine zusätzliche Belastung bei den Stromerzeugungskosten von weniger als 0,1 DPf/kWh. Gemessen an den Stromerzeugungskosten neuer Leichtwasserreaktoren (LWR) von ca. 11 DPf/kWh fällt diese Belastung nicht ins Gewicht.

Zur Untersuchung der Möglichkeiten der Einlagerung alternativer Stoffe in das Übergangslager kann festgestellt werden, daß die Lagerung von Brennelementen (BE) aus Leichtwasserreaktoren (LWR) ohne größeren technischen Aufwand bereits drei Jahre nach der Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor möglich wäre. Die Einlagerung von Brennelementkugeln aus AVR bzw. THTR und die Einlagerung von Kalzinaten ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu vertreten.

Als Resümee läßt sich feststellen, daß das vorgestellte Übergangslager den sicheren und langfristigen Einschluß hochradioaktiver verglaster Abfälle ermöglicht. Die zur Sicherheitsphilosophie gehörende aktive Abfuhr der Nachzerfallswärme bietet zusätzlich die Möglichkeit der Wärmenutzung. Darüber hinaus entfällt der Zeitdruck bei der Erschließung eines Endlagers für HAW-Glasblöcke. Die mit der Zeit geringer werdende Nachzerfallswärme während der langfristigen, oberirdischen Lagerung ermöglicht eine günstigere Packungsdichte in einem Endlager heutiger Konzeption. Zukünftige Erkenntnisse über besser geeignete Entsorgungsalternativen bzw. andersgeartete Möglichkeiten der Endbeseitigung radioaktiver Abfälle könnten genutzt werden.

Diese Arbeit enthält urheberrechtlich geschützte Angaben und Unterlagen, die Eigentum der Firmen NUKEM, KWU, BBC, GNS, STEAG, KFA-Jülich und UNI Duisburg sind. Darüber hinaus behalten sich die Firmen alle Rechte, insbesondere für den Fall der Patentverteilung und der Eintragung anderer gewerblicher Schutzrechte vor.

1. EINFÜHRUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG

Die bei der Wiederaufarbeitung abgetrennten Spaltprodukte stellen nach Jahrzehnten noch eine beachtliche Wärmequelle dar.

Die bisherige Konzeption einer Endbeseitigung in der BRD geht davon aus, eine Einbettung der Spaltprodukte in Glas vorzunehmen und die mit Spaltprodukten beladenen Glasblöcke in Salz endzulagern. Bei geeigneter Wahl der Materialien und nicht zu hoher Beladung der Glaskörper mit Spaltprodukten scheint dieses Endlagerungskonzept von allen bekannten das am ehesten annehmbare zu sein. Trotzdem ist diese Technik im Augenblick wohl aus vielen Gründen nicht in großem Umfang praktisch zu verwirklichen.

So ist z.B. die Inbetriebnahme des Bundesendlagers Gorleben erst um die Jahrtausendwende zu erwarten. Da aber die Energieversorgungsunternehmen (EVU) für den Weiterbetrieb ihrer Kernkraftwerke den Entsorgungsnachweis erbringen müssen, haben die EVU's Wiederaufarbeitungsverträge mit ausländischen Wiederaufarbeitungsanlagen abgeschlossen. Hierdurch wurde die Notwendigkeit der Inbetriebnahme einer deutschen Wiederaufarbeitungsanlage -im Jahre 1993- bzw. eines Endlagers -im Jahre 2000- hinausgeschoben.

Die Wiederaufarbeitungsverträge mit der Compagnie Générale des Matières Nucléaires (COGEMA), einer Tochter des französischen Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), sehen vor, daß bis zum Jahre 2000 die Übernahme von 2.800 t abgebrannter Brennelemente (BE) aus deutschen Kernkraftwerken (KKW) erfolgt. Ab 1. Januar 1990 ist aus Frankreich die Rückführung der in Borosilikatglas verfestigten Spaltprodukte -jährlich 225 Gebinde à 150 l- vorgesehen. Der Vertrag mit British Nuclear Fuels Limited (BNFL) beinhaltet die Lagerung und Verarbeitung von 760 t abgebrannter Brennelemente. Insgesamt sind ca. 2.700 Gebinde zurückzuführen /1-1/.

Dies hat zur Folge, daß bis zur Inbetriebnahme des Endlagers ein Lagerbedarf von 2.250 Gebinden besteht, wobei das Lager bereits im Jahre 1990 seinen Betrieb aufnehmen müßte.

Als mögliche Alternative zur Aufnahme von COGEMA-Gebinden zur sofortigen Endlagerung der Glasblöcke in Salz bietet sich die oberflächennahe Übergangslagerung -Sicherstellungslager- in technischen Anlagen an.

Hierzu ist eine Anlage denkbar, die folgende Bedingungen erfüllt:

- Die anfallende Nachzerfallswärme der Spaltprodukte sollte in einer ersten Phase von ca. 20 Jahren sicher abgeführt und gegebenenfalls nutzbringend zur Erzeugung von Heizwärme oder zum Einsatz in Limnotherm-, Hortitherm- oder Agrotherm-Betrieben bzw. zur Energieversorgung (Wärme) einer Wiederaufarbeitungsanlage verwendet werden. Der Gesamtanfall an nuklearer Wärme könnte noch erhöht werden, falls sich bei zukünftigen Entwicklungen die Abkühlzeit der Brennelemente vor der Wiederaufarbeitung verkürzt.
- Im Anschluß an die erste Phase sollte dieses Übergangslager mit neuen Glasblöcken beladen oder aber für einen langen Zeitraum -50 Jahre und mehr- als Sicherstellungslager genutzt werden können.

- Die nachweislich kontrollierte Lagerung der Abfallstoffe über lange Zeiträume in einer technisch gut überschaubaren, überwachbaren und reparierbaren sowie gegebenenfalls modifizierbaren Anlage sollte gewährleistet sein.
- Durch geeignete Auslegung und Konstruktion des Einschlußsystems sowie ein redundantes und diversitäres Wärmeabfuhrsystem sollte diese Anlage einen äußerst hohen Sicherheitsstand erreichen.

2. LAGERBEDARF IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

In den kommenden Jahren wird die Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente die Grundlage des gesetzlich vorgeschriebenen Entsorgungsnachweises darstellen.

Nach Erreichen ihres Zielabbrandes werden die abgebrannten Brennelemente - bei einem Druckwasserreaktor ein Drittel und bei einem Siedewasserreaktor ein Viertel der Kernladung - aus dem Reaktor entladen und durch frische Brennelemente ersetzt. Die entladenen Brennelemente müssen bis zur Inbetriebnahme eines unabhängigen Zwischenlagers in wassergekühlten Brennelementlagerbecken des Kernkraftwerkes lagern. Da die Lagerkapazität in den Abklingbecken jedoch begrenzt und aus genehmigungstechnischen Gründen nicht beliebig erweiterbar ist, sollen die Brennelemente in externen Trockenlagern gelagert werden.

Bei einer Kraftwerksleistung von 10 GW(el) fallen mit dem heute bei Leichtwasserreaktoren (LWR) üblichen mittleren Abbrand von 33 GW(th)/t Schwermetall und einem Lastfaktor von 0,7 ca. 295 t abgebrannter Kernbrennstoffe pro Jahr an. Dies entspricht z.B.:

- 440 Druckwasser-Brennelementen á 236 Brennstäben oder
- 1.328 Siedewasser-Brennelementen á 67 Brennstäben oder
- 23,5 m³ highly active waste (HAW) -Lösung oder
- 9,5 t Kalzinat oder
- 220 Kannen verglastem HAW (Typ COGEMA).

Der Lagerbedarf richtet sich nach einer Anzahl von Parametern, die durch die technischen und gesetzlichen Randbedingungen festgelegt werden.

Dies sind im einzelnen:

- der Brennstoffanfall:
Er wird beeinflusst durch die installierte Kernkraftwerksleistung und durch den Abbrand der Brennelemente.
 - Gemäß der 2. Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung werden im Jahre 2000 etwa 53 GW(el) und im Jahre 2010 ca. 79 GW(el) Kernenergiestrom ins Versorgungsnetz eingespeist werden. Diese Zahlen liegen auch dem Beschluß der Regierungschefs von Bund und Ländern vom 28. September 1979 zur Entsorgung zugrunde. Diese Kraftwerkskapazität ist aus heutiger Sicht bis zum Jahre 2000 nicht realisierbar.
 - Als realistisch wird eine installierte Leistung von ca. 30 GW(el) im Jahre 2000 angesehen (Tabelle 2-1).
 - Bei einem anhaltend verzögerten Ausbau kann davon ausgegangen werden, daß im Jahre 2000 etwa 20 GW(el) installierte Kraftwerksleistung vorhanden sein wird (Tabelle 2-1).

Kraftwerksstandort	in Betrieb		in Bau		in Planung	
	MWel	Inbetriebnahme	MWel	voraussichtl. Inbetriebnahme	MWel	geplante Inbetriebnahme
KWO	345	4. 1969				
KKS	662	5. 1972				
KW	670	1972				
Würgassen	1204	2. 1975				
Biblis A	1300	1. 1977				
Biblis B	855	12. 1976				
Neckarwestheim	805	11. 1976				
Brunsbüttel	907	3. 1979				
Ohu	1300	9. 1979				
Unterweser	900	3. 1980				
Philipsburg	1299	6. 1982				
Grafenrheinfeld	17	11. 1961				
Kahl	58	12. 1966				
Karlsruhe	15	1968				
Jülich	21	1978				
Karlsruhe			1316	1984	1301	1990
Krömmel			1308	1986	1362	?
Mühlheim-Kärlich			1361	1985	1314	1990/91
Grohnde			1310	1984	1300	?
Gundremmingen			1310	1985	1301	?
Gundremmingen			1360	1986/87	1301	?
Brokdorf			1349	1985	1301	?
Philipsburg			1301	1988	1368	?
Emsland			1370	1988	1300	?
Isar			1314	1989/90	1300	?
Neckarwestheim			308	1985		
Uentrop-Schmehausen			327	1987		
SNR-300						
Kalkar						
Hamm						
Wyhl						
Biblis C						
Neupotz A						
Vahnum A						
Vahnum B						
Pfaffenhofen A						
Borken						
Summe	10358		13934		10547	
Übertrag			10358		24292	
Total			24292		34839	

Tab. 2-1: In der Bundesrepublik Deutschland in Betrieb, in Bau und in Planung (erste Teilerrichtungsgenehmigung erteilt) befindliche Kernkraftwerke /2-1, 2-2/

- die Lagerkapazität im Kernkraftwerk:
Bei den älteren Kernkraftwerken, die nur über Normallagergestelle verfügen, ist diese durch die Bauausführung festgelegt. Bei den neueren Kernkraftwerken, deren Abklingbecken mit Kompaktlagergestellen ausgerüstet sind, hängt die verfügbare Kapazität von genehmigungstechnischen Gesichtspunkten ab sowie von der Bereitschaft des Betreibers, diese Kapazität voll auszuschöpfen.
- Bei den heute üblichen Endabbränden werden die Brennelemente im Druckwasserreaktor in 3 Zyklen und im Siedewasserreaktor in 4 Zyklen eingesetzt.
- Bei den Kraftwerken, die über Kompaktgestelle verfügen, können zusätzlich zum freizuhaltenden Raum 8 bzw. 9 Teilentladungen untergebracht werden. Es muß davon ausgegangen werden, daß die Genehmigungsbehörden das Radioaktivitätsinventar gering halten wollen und daß die Betreiber einen Teil dieser Kapazität als Notreserve freihalten möchten. Deshalb wird als Referenzfall für die folgende Betrachtung angesetzt, daß nur maximal 3 Entlademengen in den Kompaktgestellen untergebracht werden.
Das erste Zwischenlager wird bis Ende 1984 aufnahmebereit sein.
- die Wiederaufarbeitung:
Hierunter versteht man die Weiterverarbeitung der BE, sei es auf der Basis von Wiederaufarbeitungsverträgen mit dem Ausland oder durch inländische Wiederaufarbeitungsanlagen.
- Bis einschließlich 1986 werden alle Kernkraftwerke über Verträge mit der COGEMA (Frankreich) -ca. 2.800 t aufgearbeitete Brennelemente- bzw. BNFL (England) -ca. 760 t abgebrannte Brennelemente- entsorgt, zu einem kleinen Teil auch über die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK). Darüber hinaus haben eine Reihe von Kernkraftwerken Entsorgungsverträge mit der COGEMA bis 1990 abgeschlossen. Eine deutsche Wiederaufarbeitungsanlage mit einer Jahreskapazität von 350 t Uran (t(U)) könnte frühestens etwa 1993 in Betrieb gehen. Darüber hinaus könnte im Jahre 1999 eine 700 t/a-Anlage ihren Betrieb aufnehmen /2-3, 2-4/.

In der Tabelle 2-2 ist der erforderliche Zwischenlagerbedarf unter den gemachten Annahmen für verschiedene Zeitpunkte eingetragen. Bild 2-1 zeigt den Anfall ausgedienter LWR-Brennelemente in der Bundesrepublik Deutschland, wenn angenommen wird, daß 1990 eine Kernkraftwerksleistung von 20 GW(e) vorhanden sein wird und bis zum Jahre 2000 noch weitere 10 GW(e) neu installiert werden.

Ein Teil der anfallenden Brennelemente ist in Zwischenlagern unterzubringen. Die in den Flächen eins und zwei des Bildes 2-1 ausgewiesenen Uranmengen sind bzw. werden voraussichtlich wiederaufgearbeitet. Die verfestigten Spaltprodukte sind ebenfalls zwischenzulagern, bevor sie evtl. endgelagert werden /2-5/.

	Variante 53 GW		Variante 40 GW		Variante 30 GW		Variante 20 GW	
	bis 2000	bis 2010	bis 2000	bis 2010	bis 2000	bis 2010	bis 2000	bis 2010
Anfall an Brennelementen (t _U kumuliert)	15.500	33.000	14.000	27.000	12.000	21.000	9.600	14.800
Brennelemente in internen NABlagern der KKW (t _U)	6.500	10.000	5.000	7.000	5.000	5.500	2.600	3.800
Brennelemente (t _U) in Zwischenlagern	9.000	23.000	9.000	20.000	7.000	15.500	7.000	11.000
Zahl der Zwischenlager	6	16	6	14	5	11	5	8
Wiederaufarbeitung in der 350 Jato-Anlage (Inbetriebnahme Mitte 93)	2.300	5.800	2.300	5.800	2.300	5.800	2.300	5.800
Anzahl der Glasblöcke vom Typ COGEMA	1.800	4.600	1.800	4.600	1.800	4.600	1.800	4.600
Anzahl der Übergangs- lager	4	11	4	11	4	11	4	11
Verbleibende BE in Zwischenlagern (t _U)	6.700	17.200	6.700	14.200	4.700	9.700	4.700	9.700
Zahl der Zwischenlager	5	12	5	10	4	7	4	4
Wiederaufarbeitung in der 700 Jato-Anlage (Inbetriebnahme Mitte 99)	200	7.200	200	7.200	200	7.200		
Anzahl der Glasblöcke vom Typ COGEMA	160	5.700	160	5.700	160	5.700		
Anzahl der Übergangs- lager	1	13	1	13	1	13		
Verbleibende BE in Zwischenlagern (t _U)	6.500	10.000	6.500	7.000	4.500	2.500		
Zahl der Zwischenlager	5	7	5	6	3	2		

Tab. 2-2: Anfall abgebrannter Brennelemente und Bedarf an Zwischenlagern mit einer Kapazität von 1500 t(U)

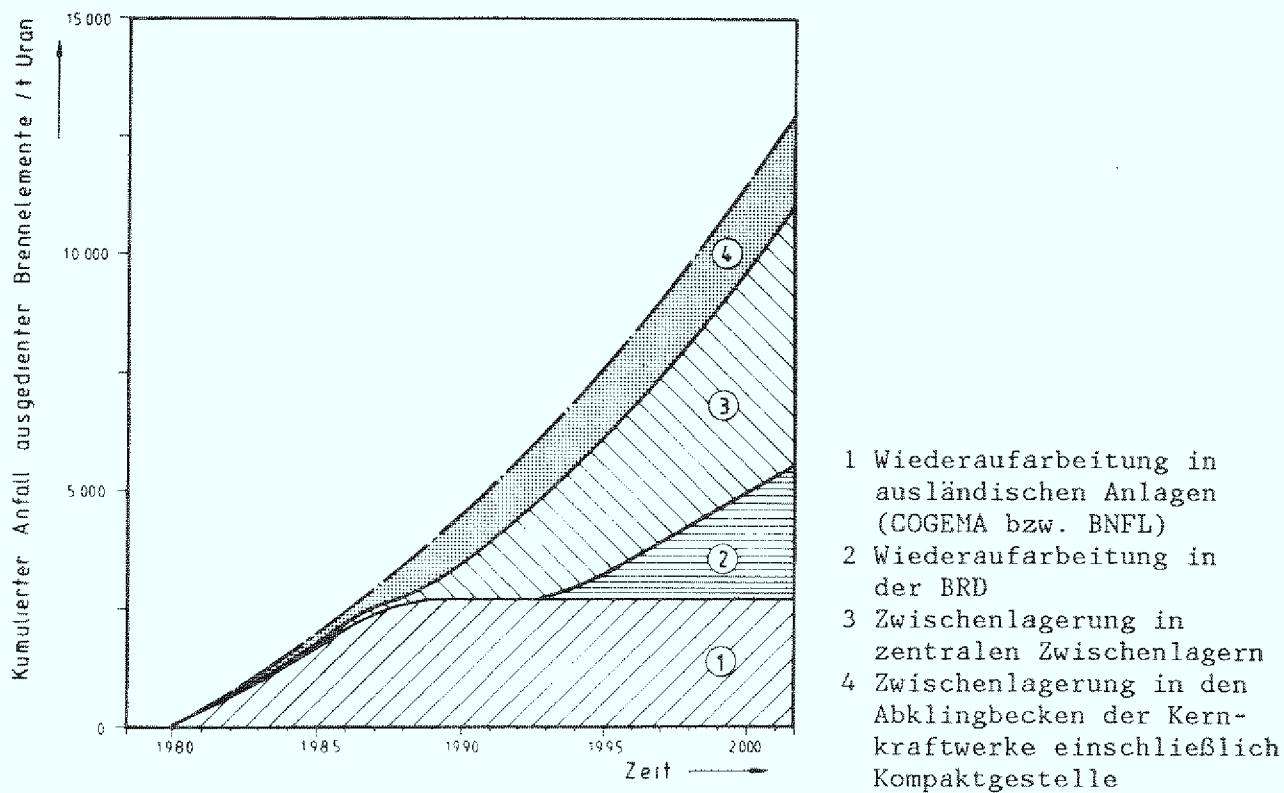


Bild 2-1: Anfall ausgedienter LWR-Brennelemente für installierte Kernkraftwerksleistung von 30 GW(el) bis zum Jahre 2000

3. LAGERKONZEPTE FÜR HAW-GLASBLÖCKE

Die Lagerung von hochradioaktivem Abfall ist kein grundsätzlich neues Problem, seit Jahren werden abgebrannte Brennelemente mit verschiedenen Technologien zwischengelagert. Ihre Weiterbehandlung besteht in einer Wiederaufarbeitung der BE zur Rückgewinnung des spaltbaren Materials. Hierbei entstehen hochradioaktive Abfälle, die verglast und in Edelstahlbehältern eingeschweißt werden. Der nächste Schritt ist die unmittelbare Lagerung der HAW-Gebinde in stabilen geologischen Formationen bzw. ihre Sicherstellungslagerung bis zur endgültigen Beseitigung. In diesem Kapitel werden Konzepte diskutiert, die von deutschen Unternehmen zur Sicherstellungslagerung der HAW-Glasblöcke konzipiert wurden.

Die Glasblocklager gewährleisten eine zeitlich begrenzte sichere Verwahrung der bei der Wiederaufarbeitung anfallenden in Glas fixierten Spaltprodukte. Sie ermöglichen einerseits eine betriebliche Entkopplung der Wiederaufarbeitungsanlage vom noch zu erschließenden Endlager, andererseits führt eine Abnahme der Nachzerfallswärme während der oberirdischen Lagerung zu einer geringeren thermischen Belastung des Salzstockes und somit zu einer besseren Ausnutzung der Endlagerstätte.

Die Einrichtungen zur Abfuhr der Nachzerfallswärme sind so ausgelegt, daß im Normalbetrieb sowie bei Einwirkungen von außen und innen ihre sichere Funktion gewährleistet ist und somit die Abgabe unzulässiger Mengen radioaktiver Stoffe an die Umwelt verhindert wird /3-1/.

Derzeit existieren in mehreren Ländern Vorhaben, die sich mit der Langzeitlagerung hochradioaktiver Abfälle aus Wiederaufarbeitungsanlagen beschäftigen. Als einziges betriebenes Konzept ist seit 1978 im französischen Marcoule ein Lager für Glasblöcke im Betrieb. Die Beschreibung der wichtigsten internationalen Konzepte zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken erfolgt im Anhang A.

3.1 NUKEM-EINKREIS-BLOCKLAGER ZUR AUFNAHME VON HAW-GLASBLÖCKEN

3.1.1 TECHNISCHER AUFBAU

Das NUKEM-Trockenlager zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken weist folgende Bereiche auf:

- die Lagerzone mit zugeordneten Zu- und Abluftzonen,
- die Übernahmezone und
- die Zone für Personal und Versorgungseinrichtungen.

Die in zwei Zeilen angeordnete Lagerzelle, der dazwischenliegende Bedienungsgang und die stirnseitige Übernahmezone mit der Übernahmestelle bilden den geschlossenen Baukörper, der alle aktivitätsführenden Einrichtungen umschließt.

Bei der Anlieferung gelangt der Transportbehälter in die Übernahmehalle des Glasblocklagers (Bild 3-1). Der Behälter wird angehoben und auf einem Transportwagen abgestellt. Nach dem Entfernen der Deckel des Transportbehälters fährt der Transportwagen unter die Öffnung der Übernahmestation und wird in die zylindrische Aussparung der Öffnung gedrückt. Nach Entfernen der letzten Barriere des Behälters ist die Öffnung für den Entladevorgang frei. Mit Hilfe des Beschickungskrans kann nun die Einlagerung der Glasblöcke erfolgen.

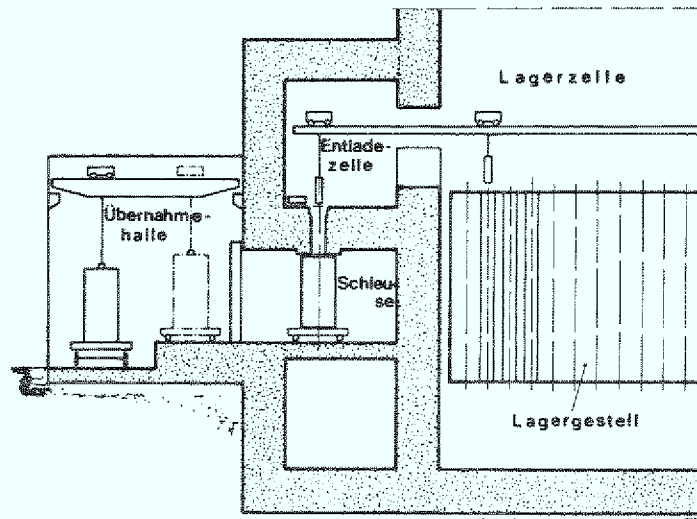


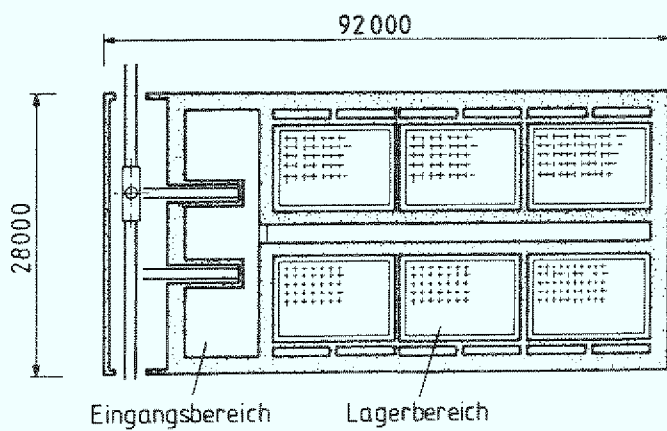
Bild 3-1: HAW-Trockenlager-Einlagerungsplan /3-2/

Bild 3-2 verdeutlicht die Konzeption dieses HAW-Lagers. Eine Zusammenstellung wesentlicher Auslegungsdaten enthält die Tabelle 3-1.

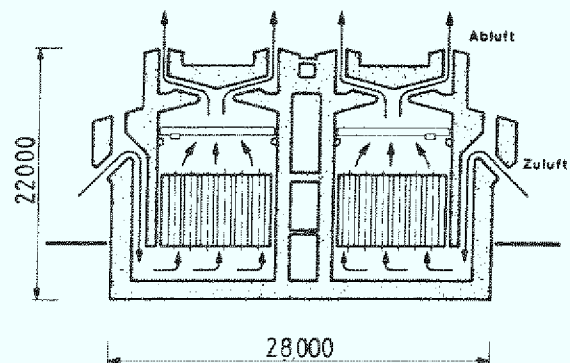
Kernstück des Glasblocklagers sind 2 identische Lagerzellen (Bild 3-2 b), in denen insgesamt 6 Lagergestelle untergebracht sind. Je drei Lagergestelle sind gebäudeseitig hintereinander angeordnet. Ein Personalgang teilt das Glasblocklager in zwei Hälften (Bild 3-2 a).

Es werden jeweils 3 Glasblöcke in einem der Lagerschächte übereinander gestapelt, woraus eine Stapelhöhe von 3,6 m resultiert. Jeder Schacht hat eine maximale Wärmeleistung von ca. 7,5 kW; dies entspricht einer Gesamtleistung von ca. 66 MW bei einem mit frischen HAW-Glasblöcken gefüllten Lager. Die Glasblöcke enthalten den mit einer Beladung von 16 Gewichtsprozent in Borosilikatglas eingeschmolzenen HAW. Der Waste hat eine Kühlzeit von mindestens 6 Jahren nach Reaktorentnahme. Die Lagerkapazität des NUKEM-Blocklagers beträgt 25.800 HAW-Glasblöcke, dies entspricht ca. 34.400 t Uran.

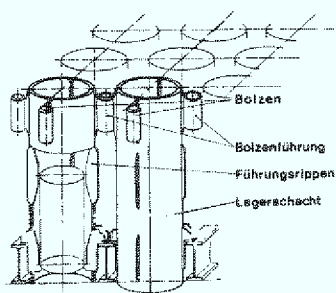
Die Umgebungsluft wird mit einer Temperatur von 35 Grad C über seitliche Zuluftöffnungen durch Schächte in eine Zuluftkammer unterhalb des Lagergestells eingeleitet. Von hier aus verteilt sie sich gleichmäßig auf die einzelnen Lagerschächte. Die freigesetzte Wärme wird von den Glasblöcken zum Teil durch Konvektion infolge des natürlichen Auftriebs an die Luft und zum Teil durch Strahlung an die Schachtwand (Schachtwandtemperatur 124 Grad C) abgeführt. Die Schachtwand soll die aufgenommene Wärme ebenfalls nach innen an die Kühlluft abgeben, da sich so die effektivste Kühlwirkung einstellt. Dies wird dadurch erreicht, daß Konvektionsströmungen in den Lagergestellzwischenräumen und in leeren Schächten durch Abdeckbleche bzw. durch aufgelegte Deckel weitgehend unterbunden werden.



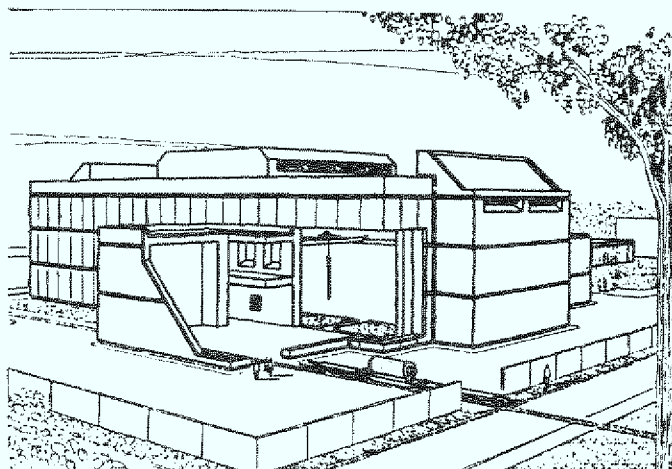
a)



b)



c)



d)

Bild 3-2: Trockenlager zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken aus der Wiederaufarbeitung

- a) Grundriß b) Querschnitt
c) Lagergestell d) perspektivische Darstellung

Daten des Lagergutes		Daten der Anlage	
Abmessungen der Glasblöcke * Typ CODEMA * Höhe 1335 mm * Durchmesser 430 mm * Wandstärke 5 mm * Inhalt 0,15 m ³		Gebäude Hauptabmessungen - Empfangsbereich * Länge ca. 65 m * Breite 15 m * Höhe des Gebäudes 20 m über Erdbereich - Lagerbereich * Länge 34 m * Breite 28 m * Höhe 22 m * Durchmesser -- * überbaute Fläche 1750 m ² * Umbauter Raum 38500 m ³	
Material des Glasblockmantels Edelstahl Material des Glases Borosilikatglas Gewicht des Mantels 115 kg Gewicht des Borosilikatglases 405 kg Dichte des Borosilikatglases 2700 kg/m ³ Metalloide im Glas 65 kg/Glasblock * Gew.-% 16 Einlagerungszeitpunkt nach Reaktorenentnahme 6 Jahre Aktivitätsinventar zum Zeitpunkt der Einlagerung 5 * 10 ¹⁶ Bq/Glasblock Dosisleistung eines Glasblockes 2 * 10 ⁵ rad/h an der Oberfläche		Lagerkapazität * Anzahl der Lagermodule 6 * Anzahl der Lagerschächte 1450 Schächte/Modul * Stapelung (übereinander) 3 fach * Fassungsvermögen 6 * 4300 Glasblöcke * Lagerausnutzung * gleichwertige Brennelementmenge 6 * 5750 t U _{eqv}	
Wärmeproduktion eines Glasblockes * zum Einlagerungszeitpunkt 2500 W (6 a nach Reaktorenentnahme) Leistungsdichte 17000 W/m ³ Wärmestromdichte 1400 W/m ² Glasstemperaturen * max. zulässige 450 °C * max. Zentraltemperatur 402 °C (Betrieb) Wandtemperatur des Glasblockes (1) Verweilzeit in der Anlage 30 Jahre		max. Wärmeleistung 11 MW Kühlung freie Konvektion * Wärmeträger Luft * Betriebsdruck drucklos * Massenstrom (1) * Luftdurchsatz (1) Temperaturen * Lufteintritt 27 °C * Luftaustritt 104 °C * Lagerzelle/-behälter 140 / 226 °C	

Tab. 3-1: Auslegungsdaten des NUKEM-Glasblocklagers /3-1, 3-2/
(1) Daten nicht bekannt

Die erhitzte Luft strömt aus den Lagerschächten in eine Abluftkammer ein, von wo sie sich auf die Abluftschächte verteilt und dann über die Abluftöffnungen senkrecht nach oben in die Umgebung austritt. Die Luftaustrittstemperatur beträgt ca. 83 Grad C. Der Wärmetransport im Inneren des Glasblocks erfolgt durch Wärmeleitung.

Aus Objektschutzgründen werden die Zuluftöffnungen in 10 m Höhe über der Erdoberfläche angelegt. Sie führen schräg nach oben bzw. vom Dach her senkrecht nach unten. Hierdurch verhindert man,

- daß beim Störfall "Flächenbrand vor dem Lager" heiße Rauchgase in das Lagergebäude einströmen,
- daß Flüssigkeiten, wie Regenwasser oder Kerosin in das Lager fließen und
- daß Explosionsdruckwellen ungehindert in das Lager eindringen können.

Eine Aufstau- und Tropfkante (Bild 3-2b) verhindert ein Eindringen von Flüssigkeiten durch die Abluftöffnungen. Das Eindringen zündfähiger Gase kann durch die gewählte Konstruktion der Luftansaugöffnungen nicht verhindert werden. Die Lagergestelle sind gegen Impulskräfte aus dem Lastfall "Flugzeugabsturz" und gegen Schwingungen aus dem Lastfall "Erdbeben" gesichert. Ferner ist das Lagergestell so ausgelegt, daß Explosionen und Detonationen, die außerhalb des Lagergebäudes erfolgen, keine Schädigungen am Lagergut hervorrufen können. Die Lagergestelle (Bild 3-2c) bestehen aus senkrechten, verschweißten Stahlrohren, die untereinander durch Bolzenführungen beweglich verbunden sind. Innerhalb der Lagerschächte sind Abstandshalter vorgesehen, die einen definierten Ringspalt zwischen Lagergut und Lagerschacht gewährleisten /3-1, 3-2/.

3.1.2 SICHERHEITSTECHNISCHE MERKMALE

Bei bestimmungsgemäßem Betrieb des Lagers ist die Zerfallswärme sicher abzuführen und der Schutz von Personal und Umgebung vor direkter Strahlung und vor Kontamination oder Inkorporation zu gewährleisten.

Der Schutz vor direkter Strahlung wird durch die entsprechende konstruktive Auslegung der den Lagerbereich einschließenden Bauten gewährleistet. Zur Verhinderung von Kontamination und Inkorporation werden kontrollierende und administrative Maßnahmen (Zugangskontrolle, Personendosismessung) vorgeschrieben. Während des bestimmungsgemäßen Betriebs der Anlage verhindert die sichere Umschließung der radioaktiven Stoffe eine Kontamination oder Inkorporation. Durch Überwachung der Umgebung wird die Auswirkung von Aktivitätsfreisetzung über die Luft aufgezeigt. Bei Reparatur- und Wartungsarbeiten müssen zusätzliche Maßnahmen (tragen von Schutzanzügen) ergriffen werden.

Das Lager ist gegen Flugzeugabsturz ausgelegt. Bei einem Flugzeugabsturz mit anschließendem Kerosin-Brand wird von einer Branddauer von 15 Minuten bei 1200 Grad C ausgegangen. Das Lager ist so ausgelegt, daß die maximal zulässige Temperatur der Glasblöcke 500 Grad C nicht überschreitet.

Ferner ist das Lager so ausgelegt, daß durch die Auswirkungen chemischer Explosionen, die weit außerhalb des Lagers stattfinden, die Kühlung nicht beeinträchtigt wird und daß keine Glasblöcke zerstört werden. Die gleichen Voraussetzungen sind für die möglichen Einwirkungen von äußeren Flächenbränden zu treffen. Durch die Wahl der Naturkonvektionskühlung, welche ein direktes und ungehindertes Ansaugen von Umgebungsluft voraussetzt, ist es möglich, giftige und explosionsfähige Gase in den Lagerbereich anzusaugen (vgl. Kap. 3.1.3.4).

Das Lager ist gegen Erdbeben -KTA Regel 2201 vom Juni 1975-, d.h. für die spezifischen Standortbedingungen, ausgelegt.

3.1.3 SPEZIFISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUM EINKREIS-BLOCKLAGER

Die folgenden Ausführungen behandeln Fragestellungen, die sich spezifisch für das NUKEM-Lagerkonzept stellen und u.U. noch gezielter Untersuchungen bedürfen.

3.1.3.1 Korrosion der verwendeten Stähle

Die metallischen Lagereinbauten sind über lange Zeiten einem Luftdurchzug auf erhöhtem Temperaturniveau ausgesetzt. Da keine Filterung der eintretenden Umgebungsluft vorgesehen ist, wirkt sie korrodierend auf die verwendeten Stähle.

Kennzeichnend für nichtrostende Stähle ist ihr passiver Zustand, d.h. sie zeichnen sich dadurch aus, daß bei üblicher Beanspruchung eine sehr dünne, aber dichte Oxidschicht auf der Oberfläche gebildet wird, die das darunterliegende Metall vor jedem weiteren Angriff schützt. Diese passivierende Eigenschaft erhält das Eisen durch Zulegieren von Chrom, und zwar ist bei etwa 12% Chrom ein deutlicher Sprung im Passivierungsverhalten festzustellen. Unterhalb 12% hat Chrom zwar auch eine korrosionsverlangsamende, nicht aber verhindernde Wirkung zur Folge. Über etwa 12% Chrom kommt es zur Bildung der genannten Passivschicht und damit zu einer nahezu völligen Unterbindung aller Austauschvorgänge. Korrosion ist ihrer Natur nach ein elektrochemischer Vorgang, d.h. alle ablaufenden Reaktionen sind Vorgänge sowohl mit Stoff- als auch Ladungsaustausch.

Bei nichtrostenden Stählen treten örtliche und selektive Korrosionsprobleme auf. Im wesentlichen sind es fünf Korrosionsformen, die sich teilweise überschneiden können. Dies sind:

- **Interkristalline Korrosion**
Zu ihr kommt es, wenn ein nicht sachgemäßer Wärmebehandlungszustand der Stähle vorliegt. Durch lange Verweilzeiten im Bereich zwischen 600 und 800 Grad C neigt der in allen Stählen vorhandene Kohlenstoff dazu, sich mit dem Chrom zu einem chromreichen Karbid zusammenzulagern und an den Korngrenzen auszuscheiden. Unmittelbar neben den Korngrenzen kommt es dadurch zu einer Chromverarmung, da Chrom im Gegensatz zum Kohlenstoff nicht schnell genug nachdiffundieren kann, so daß es örtlich zur Unterschreitung des Chromgehalts kommt, wodurch der Passivierungszustand nicht aufrechterhalten bleibt. Die Folge ist der sogenannte Kornzerfall, d.h. bevorzugter Korrosionsangriff entlang der Korngrenzen (Rosterscheinungen auf der Außenhaut).
- **Lochkorrosion (Lochfraßkorrosion)**
Verantwortlich für diese Korrosionsart, bei der sich über der Oberfläche verteilt mehr oder weniger tiefe vereinzelte Löcher bilden, die die gesamte Wand durchdringen können, sind Halogen-Ionen (Chlorid-Ionen), die sich in die oxidische Passivschicht einnisten und an dieser Stelle zu einem Durchbruch führen. Durch eine flächenmäßig sehr kleine Anode und eine sehr große Kathode werden sehr hohe Auflösungsgeschwindigkeiten erreicht. Innerhalb weniger Monate kommt es zur Zerstörung des Bauteils.
- **Spannungsrißkorrosion**
Diese Korrosionsform bedarf neben eines spezifischen Angriffsmittels, dies sind nahezu ausschließlich chloridhaltige Medien, noch erhöhter Temperaturen (ab etwa 50 Grad C aufwärts) sowie gleichzeitig vorliegender Zugspannung (Betriebsspannungen, Eigenspannungszustände). Im allgemeinen sind von dieser Korrosionsart nur austenitische Stähle (z.B. V2A- und V4A-Stähle) betroffen. Kennzeichnend für diese Korrosionsform ist ein nahezu verformungsloser Bruch der Bauteile, der dem ersten Anschein nach auf keine Mitwirkung von Korrosion schließen läßt.
- **Spaltkorrosion**
Die Bildung einer Passivschicht erfordert Sauerstoff. Das gilt nicht nur für den einmaligen Bildungsvorgang der Schicht. Da auch im Passivzustand langsame Korrosionsvorgänge ablaufen, muß diese ständig erneuert werden, um stabil zu bleiben. Wird deshalb jeder Sauerstofftransport durch zu lange Diffusionswege in engen Spalten unterbunden, so kommt es je nach Angriffsbedingungen, bei denen auch das Chlorid-Ion wieder eine dominierende Stellung einnimmt, zur Auflösung der Passivschicht, das Metall geht an diesen Stellen in den Aktivzustand über und korrodiert.
- **Kontaktkorrosion**
Bringt man zwei unterschiedliche Werkstoffe in die gleiche Lösung und haben die Werkstoffe direkten metallischen Kontakt miteinander, so bildet sich ein sogenanntes Mischpotential aus, wobei das edlere zu unedleren und das unedlere zu edleren Potential-Werten verschoben wird. Wie weit die Werkstoffe sich dabei von ihrer spezifischen Potentiallage entfernen, hängt auch von den Flächenverhältnissen der beiden kurzgeschlossenen Metalloberflächen ab /3-3/.

Für die Beurteilung des Korrosionsverhaltens des Edelstahlmantels der Glasblöcke sind folgende Tatsachen zu berücksichtigen:

- Beim Abfüllen der Glasschmelze (ca. 1200 Grad C) in den Edelstahlmantel (Werkstoff-Nr. 1.4571, X 10 Cr Ni Mo Ti 18 10, austenitischer Stahl) bildet sich an der Kokillenoberfläche eine abblätternde Zunderschicht. Diese Verzunderung wird vor dem Transport in das Sicherstellungslager mit Stahlbürsten entfernt.
- Bei einer Wandtemperatur von ca. 650 Grad C bekommt die Kokille eine dunkle Anlauffarbe. Wird der Werkstoff längere Zeit auf dieser Temperatur gehalten, bildet sich eine festhaftende Zunderschicht aus.
- Die angesprochenen Korrosionsformen benötigen zum Korrosionsfortlauf nahezu ausschließlich chloridhaltige Medien bei erhöhten Temperaturen (> 50 Grad C).

Somit kann zusammenfassend gesagt werden, daß die Korrosion wahrscheinlich nicht zu einem Versagen der Edelstahlkokille führen wird, wenn:

- die richtige Wahl der Strukturwerkstoffe erfolgt und damit Kontaktkorrosion auszuschließen ist,
- das Kühlmittel Luft keine Chloridionen enthält und
- die Kokille nicht durch Spannungszustände (Eigen-, Betriebsspannungen) belastet wird, so daß Spannungsrißkorrosion, für die Cr-Ni-Stähle besonders anfällig sind, ausgeschlossen werden kann.

Für eine endgültige Aussage ist es noch erforderlich, Langzeitversuche durchzuführen. Diese Versuche wurden bereits für einen "HAW-Behälter als Barriere im Endlager" durchgeführt. Als korrodierendes Medium wurde eine quinäre Lauge (gesättigte Salzlösung; die Zusammensetzung der Salzlösung bei 170 Grad C in Gew.-%: $MgCl_2$ (45,0%), KCl (3,7%), $MgSO_4$ (3,3%), $NaCl$ (1,0%), und H_2O (47,0%)) vorausgesetzt. Bei diesen Versuchen /3-4/ zeigte der Werkstoff Hastelloy C4 (Ni Mo 16 Cr 16 Tr) seine Eignung für Behälter mit Barrierenfunktion im Endlager. Der gewählte Mantelwerkstoff kommt aufgrund seiner Lochfraßanfälligkeit nicht als Behälter mit Barrierenfunktion in dieser Umgebung in Frage.

3.1.3.2 Durchzug von Kleinlebewesen durch das Lager

Durch die Wahl der direkten Naturzugkühlung der HAW-Kokillen mit aus der Umgebung angesaugter Luft ohne vorherige Filterung gelangen Stäube, Insekten, Mikroorganismen etc. in Bereiche sehr hoher Strahlendosen, z.B. in den Luftspalt zwischen Kokille und Lagerschacht (Bild 3-2c). Gerade diese Tatsache könnte Einsprüche gegen dieses Lagerkonzept bewirken, die durch experimentelle Untersuchungen kaum zu entkräften sind.

So könnte es beim Eindringen, Aktivieren und Austragen von Stäuben zur Verschleppung von Radioaktivität in die das Lager umgebenden Gebiete kommen. Zur Beurteilung dieses Verbreitungsmechanismus sind die Verweilzeiten im hohen Strahlungsfeld von wesentlicher Bedeutung. In Strömungsträumen lagern sich z.B. Stäube ab, die dadurch ein Vielfaches der Ver-

weilzeit gegenüber solchen Partikeln besitzen, die ohne Ablagerung mit dem Luftstrom durch das Lager getragen werden. Hierdurch könnten dann spürbare Aktivierungen hervorgerufen werden. Ein Nachweis der Unbedenklichkeit dürfte sehr schwerfallen.

Bezüglich Insekten und Mikroorganismen ist das Problem noch umfangreicher. Es ist dabei zu klären,

- ob alle Organismen durch die Hitzeeinwirkung im Lager abgetötet werden,
- ob die aufgenommene Strahlendosis sicher letal ist,
- ob im Bereich nicht letaler Strahlendosen Mutationen auftreten und
- ob die auftretenden Mutationen für den Menschen gefährlich werden können.

Die beiden zuerstgenannten Punkte können mit Sicherheit verneint werden, da im Lagerbereich aufgrund der zeitlich sinkenden Nachwärmeleistung die Temperaturen sowie Strahlenfelder niedriger werden. Hierdurch wird sich im Laufe der Lagerperiode ein Zeitpunkt einstellen, ab dem die Punkte 1 und 2 unwesentlich werden.

In /3-5/ ist eine Untersuchung der NUKEM zu den o.g. Punkten enthalten, die für Glasblock-, Brennelement- und Kryptonlager der diskutierten Bauart gilt. Hierin kommt man durch Befragung zum Ergebnis, daß für Mikroorganismen keine radiologischen Auswirkungen zu erwarten sind, und daß bei Insektenvölkern auf Dauer eine erhebliche Strahlenresistenz zu erwarten wäre. Ein experimenteller Nachweis scheint bisher noch nicht vorzuliegen.

Einen Ansatz zur Beantwortung der Punkte 3 und 4 kann man ggf. durch Analogieschlüsse zu heute in der Technik verwendeten hohen Strahlendosen finden /3-6/. So werden z.B. heute in der Röntgendiagnostik, Materialbestrahlung, Materialprüfung, Sterilisation, Beschleunigertechnologie usw. hohe Strahlendosen verwendet, die nicht nur den gewünschten Zweck erfüllen, sondern auch Mikroorganismen und Insekten treffen. Bisher sind noch keine gefährlichen und/oder überlebensfähigen Mutationen entdeckt worden.

Man könnte diese Tatsache damit erklären, daß die Natur aufgrund der ungezählten Generationen bereits alle Mutationen durchlaufen hat, auch wenn sie uns nicht bekannt sind, und daß sich nur die stärkste als lebensfähig durchgesetzt hat. Experimente scheinen diese These zu bestätigen. Man ist in der Lage, mutierte Bakterienkulturen unter sterilen Bedingungen zu züchten und stellt fest, daß sie lebensfähig sind. Sobald sie aber ungeschützt der "Umgebung" ausgesetzt werden, also im Existenzkampf stehen, verschwinden sie wieder sehr schnell, sie sind nicht überlebensfähig /3-6/.

3.1.3.3 Durchführbarkeit der Luftfilterung

Eine Voraussetzung für die Realisierbarkeit des NUKEM-Einkreislagere auf der Basis von Naturkonvektion sind geringe Strömungswiderstände. Andererseits sollte vermieden werden, daß Insekten und Mikroorganismen das Lager frei verlassen können. Eine Lösungsmöglichkeit wäre der Einbau von Filtern an der Luftaustrittsseite des Lagers.

Das NUKEM-Lager benötigt zur Kühlung der eingelagerten HAW-Glasblöcke bei einer Leistung von 66 MW und einer Aufheizspanne von 77 Grad C ($T(E) = 27$ Grad C, $T(A) = 104$ Grad C) einen Massenstrom von 850 kg/s. Somit müssen stündlich 2.400.000 Nm³ Kühlluft durch das Lager geführt werden.

Um die Montage der Filter an den Luftaustrittsöffnungen ohne aufwendige Hebezeuge durchzuführen, ist eine Begrenzung der geometrischen Abmessungen und des Gewichtes der Einzelfilter erforderlich.

Es werden daher Filter der Sonderstufe S (Abscheidegrad 99,999%) verwendet (KTA 3601) /3-7/. Dies sind Schwebstofffilter für höchste Ansprüche aus hochporösem Glasfaserpapier, über Aluminium-Abstandshalter gefaltet und in Holzrahmen elastisch vergossen.

Die technischen Daten dieser Filter sind:

Betriebsdruckdifferenz		
* Anfangswiderstand	250	Pa
* Endwiderstand	1.000	Pa
Volumenstrom	2.200	Nm ³ /h
Abscheidegrad	99,999	%
Länge	762	mm
Breite	610	mm
Höhe	292	mm

Zur Überwindung des Endwiderstandes (Austauschzeitpunkt) von 1000 Pa ist es notwendig, die treibende Druckdifferenz zwischen Luftein- und -austritt durch Kaminwirkung zu erhöhen, d.h. die vertikalen Abstände der Luftöffnungen müssen auf ca. 78 m erhöht werden, um diesen Druckverlust zu kompensieren. Diese Überhöhung ließe sich absenken, falls man die Einsatzzeit der Filter nicht bis zum Erreichen ihrer "Austauschverschmutzung" ausdehnt, sondern z.B. bei einem gemessenen Druckverlust von 750 Pa bereits austauscht. Die zusätzliche Überhöhung sinkt dann auf ca. 52 m.

Für das Lager ist eine Filterfläche von 560 m² notwendig, das entspricht ca. 1200 Filtern (pro Filter 2000 Nm³/h). Die Kosten für einen Filteraustausch betragen bei einem Filterpreis von ca. 450 DM/Filter, 500.000 DM pro Austausch. Die Häufigkeit des Austauschs wird allein durch den Verschmutzungsgrad der angesaugten Luft bestimmt.

3.1.3.4 Zündung explosibler Gemische

Die Zündung eines zündfähigen Gemisches ist an folgende Voraussetzungen gebunden:

- Die Zündquelle und das Gasgemisch müssen zeitlich und örtlich zusammentreffen.
- Es muß eine hinreichende Zündtemperatur (Zündenergie) vorhanden sein, z.B. heiße Oberflächen.

Um die Auswirkungen einer Explosion differenzierter zu betrachten, ist es notwendig, die Einflüsse von Explosionsort und Druckwirkung auf das Lagergebäude näher zu untersuchen /3-8, 3-9/.

- Explosion im Freien
Die Reaktionsfront bewegt sich nach der Zündung der Gaswolke durch das Gasgemisch. Hierbei beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit einige hundert Meter pro Sekunde, wobei der Druck innerhalb von Millisekunden auf einige hundert Millibar steigt.
Im Falle einer Detonation, die aus einer Explosion durch behinderte Flammenausbreitung entsteht, erreicht die Reaktionsfront Geschwindigkeiten von 2000 m/s und statische Spitzendrücke von 10 bis 20 bar. Diese Werte können durch Reflexion an feststehenden Gebäuden oder Erdaufschüttungen noch übertroffen werden.
- Explosion im Gebäude
In Räumen sind zwei verschiedene Druckwirkungen zu beachten: von der Reaktionsfront ausgehende Druckwellen wie bei der Explosion im Freien einerseits und andererseits durch Reflexion an Wänden und Einbauten beschleunigte Reaktionsfronten, die oft lokale Detonationswellen von einigen zehn bar auslösen. Die eingeschlossenen Verbrennungsgase erzeugen hingegen nur einen Kammerdruck von 5 bis 10 bar.
- Druckwirkung auf die Lagergebäude
Hier sind wiederum drei Fälle zu unterscheiden:
 1. Gasexplosion in großer Entfernung vom Gebäude
Hierbei erreicht die Druckwelle nach Abschluß des Verbrennungsprozesses das Gebäude und dringt durch die Luftöffnungen ins Gebäude ein. Die Auswirkungen auf Lagergut und Gebäude sind wegen der geringen Überdrücke (mbar) beherrschbar.
 2. Die Zündung und Deflagration der Gaswolke in der Nähe außerhalb des Gebäudes
Die Übertragung auf das Innere des Lagergebäudes erfolgt durch die Luftöffnungen, wobei eine Flammenbeschleunigung wahrscheinlich ist. Hierbei sind Stoßwellen von 20 bar und mehr zu erwarten, die anschließend in einem Kammerdruck von ca. 10 bis 20 bar übergehen /3-8/.
 3. Die Zündung der Gaswolke erfolgt im Gebäude
Die Flammenfront wird in den Luftkanälen beschleunigt, wodurch es zur Detonation der äußeren Gaswolke kommt. Ein Luftstoß von 20

bar wirkt von außen auf das Lagergebäude /3-8/. Je nach Lage der Zündquelle und Verteilung der Gaswolke im Gebäude kann durchaus eine Detonation im Gebäude ausgelöst werden.

Als Auswirkungen von Zündungen explosibler Gemische auf das Sicherstellungslager treten Hitzeeinwirkungen, die wegen des schnellen Verbrennungsablaufs kaum Bedeutung erlangen, und mechanische Wirkungen durch Stöße infolge des plötzlichen Druckanstieges auf.

Zur Vermeidung von Schäden wäre eine Auslegung des Gebäudes gegen Innendrucke von 20 bar vorzunehmen. Die erforderliche Wandstärke würde dazu ein Vielfaches der für die Strahlenabschirmung und zum Schutz gegen Erdbeben und Flugzeugabsturz notwendigen betragen.

Zur Verhinderung solcher Überdrücke wäre es erforderlich, ausreichende Entlastungsöffnungen vorzusehen. Die vorhandenen Ansaug- und Ausströmöffnungen reichen hierzu nicht aus /3-8/.

Als mögliche Maßnahmen zur Vermeidung von Explosionen im Inneren des Lagergebäudes wurden in /3-8/ z.B. das Einhalten von Sicherheitsabständen, das Verschließen der Luftöffnungen, das Umleiten der Gaswolke usw. vorgeschlagen. Ob aber durch diese Maßnahmen der Eintritt und die Zündung explosibler Gemische in das Lagergebäude ausgeschlossen werden kann, ist fraglich. Auch ist bisher nicht untersucht worden, wie Detonationen und die dadurch entstehenden hohen Drücke auf die Kannenanordnung wirken. Bei Detonationen im unteren Strömungsplenum ist ein Herausschießen der Kokillen aus den Lagergestellen nicht auszuschließen. Je nach erreichter Geschwindigkeit wäre ein Zerplatzen beim Anprall gegen die Gebäudedecke denkbar, mit nachfolgender Freisetzung radioaktiver Substanzen in die Umgebung. Die Freisetzung wird durch die auftretende Druckwelle begünstigt.

3.2 KWU-ZWEIKREIS-BLOCKLAGER ZUR AUFNAHME VON HAW-GLAS-BLÖCKEN

3.2.1 TECHNISCHER AUFBAU

In Bild 3-3 ist das Blocklager der KWU mit einer Lagerkapazität von 2.500 Glasblöcken dargestellt. Es besteht im wesentlichen aus:

- dem nicht gegen Einwirkungen von außen (EVA) geschützten Transportbehälter-Empfangsbereich: Er dient zur Einschleusung der ankommenden Transportbehälter.
- dem Entladebereich: Hier sind die gegen EVA zu schützenden Anlagenteile angeordnet. Es sind dies vor allem:
 - die HAW-Glasblock-Entladezelle mit Bedienungsräumen,
 - die Korbstationen,
 - die Handhabungs-, Transport- und Übergabeeinrichtungen an den Lagerbereich
- dem Lagerbereich: In ihm erfolgt die langfristige Lagerung der Glasblöcke.

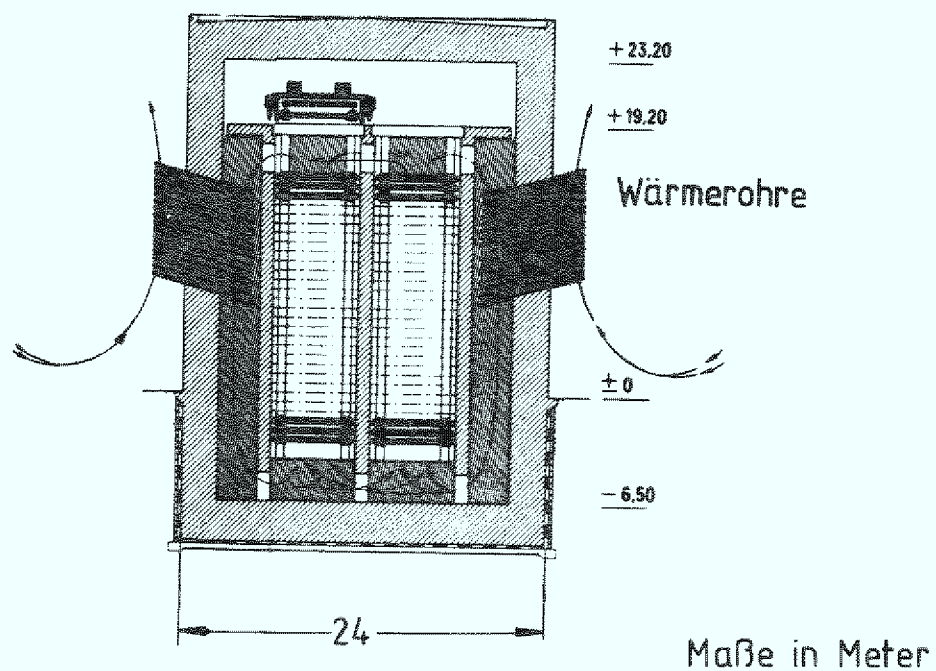
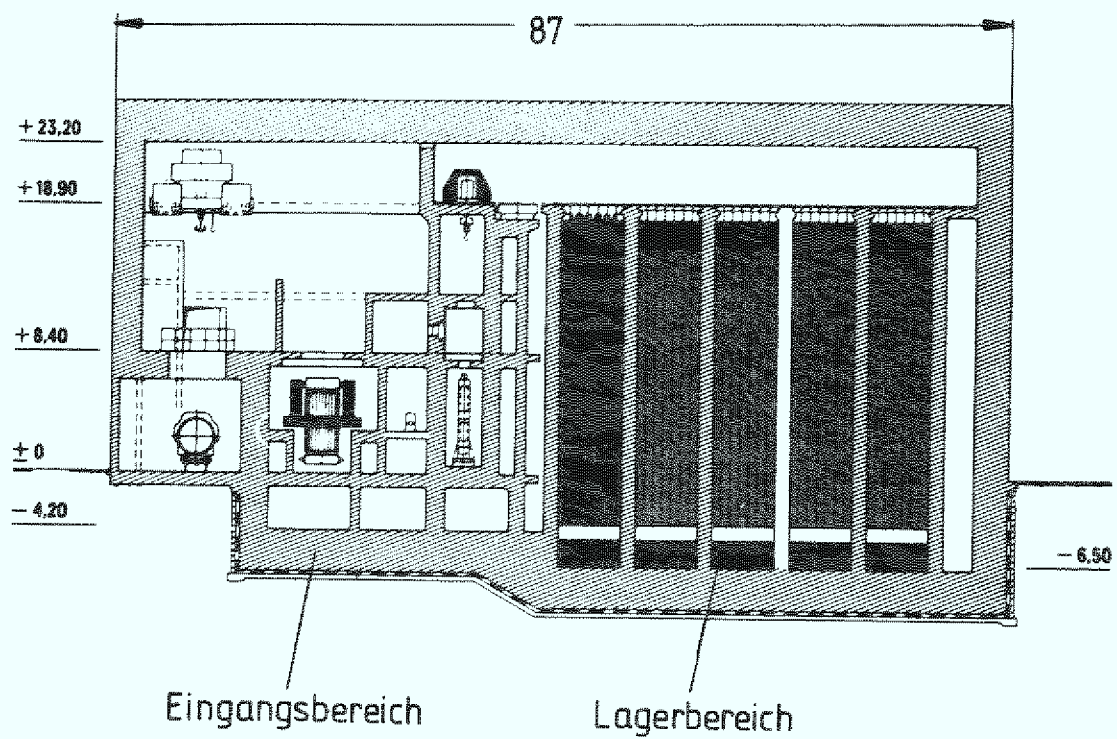


Bild 3-3: KWU-Zweikreis-Blocklager für HAW-Glasblöcke
(COGEMA) /3-10, 3-11/

Die angelieferten Transportbehälter werden im Transportbehälter- Empfangsbereich mit dem Gebäudekran vom Eisenbahnwaggon oder LKW gehoben und durch die Schleuse in den darunter befindlichen Transportbehälterwagen gehängt.

Der Transportbehälterwagen fährt unter die Entladeposition der Zelle. Nach Ankoppeln des Behälters an die Entladezelle erfolgt das Öffnen des Zellendeckels sowie der Transportbehälterdeckel. Die Glasblöcke werden einzeln entladen und im Pufferlager abgestellt. Nach vollständiger Entladung des Transportbehälters erfolgt das Ausschleusen des Behälters aus dem Empfangsbereich.

Die dem Pufferlager entnommenen Glasblöcke werden in gesicherten und mit Abstandshaltern ausgerüsteten Lagerkörben eingeschlossen. Der Transport der Lagerkörbe zur Übergabestation des Lagerbereichs erfolgt ferngesteuert. Die Belademaschine übernimmt an der Schnittstelle Empfangsgebäude/Lagerbereich die Lagerkörbe, fährt sie zur vorher bestimmten Position und legt sie in die Haltevorrichtung des Lagergestells ab /3-11/.

Die Lagerkörbe mit jeweils 3 Glasblöcken sind im Lagerbereich horizontal angeordnet, um so den gegenüber der vertikalen Strömung besseren Wärmeübergang zu nutzen.

Im Lagermodul sind die Lagerkörbe wie folgt aufgeteilt:

- Horizontale Teilung	0,7 m
- Vertikale Teilung	0,55 m
- Anzahl der Lagerschächte nebeneinander	7
- Anzahl der Lagerkörbe übereinander	12 .

Die unter geringfügigem Unterdruck stehende Luft im Lagerbereich wird durch Naturumlauf umgewälzt. Sie steigt in den Lagerschächten nach oben, übernimmt dabei die Wärme von den Lagerkapseln und gibt diese an Wärmerohre ab. In den Wärmerohren wird durch stetige Verdampfung und Kondensation das Kühlmedium im Naturumlauf gehalten und so zum Transport der Wärme verwendet. Die Umgebungsluft kühlt die Wärmerohre, die außen durch eine Stahlkonstruktion fixiert sind. Diese ist so ausgelegt, daß sie ausserdem eine Kaminwirkung auf die zur Kühlung dienende Umgebungsluft ausübt (Bild 3-4).

Die Zahl der Wärmerohre auf einer Gebäudeseite wird so gewählt, daß sie die Abfuhr der insgesamt anfallenden Nachzerfallswärme gewährleisten. Die in den Außenwänden des EVA-geschützten Lagerbereichs eingelassenen Wärmerohre sind bei Beschädigung von außen austauschbar.

Wie der Aufbau dieses Zweikreis-Blocklagers zeigt, ist die Kühlluft im Lagerbereich durch eine Druckbarriere (Unterdruck im Lagerbereich) und durch eine mechanische Barriere (Wände und/oder Wärmerohre) von der Umgebungsluft getrennt. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Auslegungsdaten enthält die Tabelle 3-2 /3-10, 3-12/.

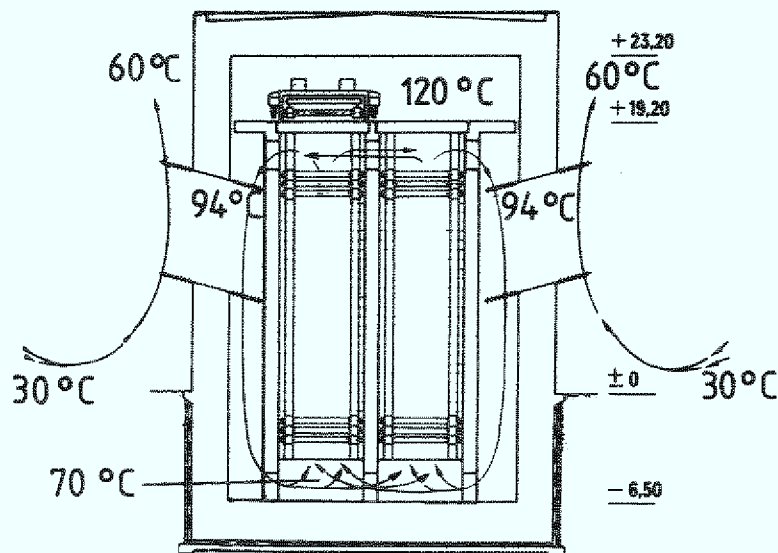


Bild 3-4: Luftströmung im KWU-Zweikreis-Blocklager /3-10/
(Maßangaben in Meter)

3.2.2 SICHERHEITSTECHNISCHE MERKMALE

Für das KWU-Blocklager sind für die Kontamination bzw. Inkorporation die gleichen Anforderungen zu stellen, wie dies bereits für das NUKEM- Lager ausgeführt wurde (Kap. 3.1.2). Dies gilt natürlich auch für die sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme.

Wie aus der technischen Beschreibung des Lagers hervorgeht, handelt es sich hierbei -im Gegensatz zum NUKEM-Lager- aber um eine Zweikreisanlage. Der innere Naturkonvektionskreislauf nimmt die Nachzerfallswärme auf und führt sie an Wärmerohre, die in die Außenwände des Lagers integriert sind, wieder ab. Durch Naturkonvektion gelangt so die Wärme nach außen. Hier erfolgt die Wärmeabfuhr von den Wärmerohren an die Umgebungsluft ebenfalls durch Naturkonvektion.

3.2.3 SPEZIFISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUM KWU-ZWEIKREIS-BLOCKLAGER

3.2.3.1 Wärmerohre

Wärmerohre sind Einrichtungen zum Wärmetransport von einem wärmeabgebenden (hier: innerer Naturkonvektionskreislauf) zu einem wärmeaufnehmenden Medium (hier: äußerer Naturkonvektionskreislauf). Innerhalb eines vakuumdicht (10^{*-6} Torr) verschlossenen Rohres befindet sich ein Ar-

Daten des Lagergutes		Daten der Anlage	
Abmessungen der Glasblöcke * Typ COGEMA * Höhe 1335 mm * Durchmesser 430 mm * Wandstärke 5 mm * Inhalt 0,15 m ³		Gebäude Hauptabmessungen - Empfangsbereich * Länge 53 m * Breite 24 m * Höhe des Gebäudes 30 m Über Erdreich 27 m - Lagerbereich * Länge 34 m * Breite 24 m * Höhe 30 m * Durchmesser * Überbaute Fläche 2100 m ² * Umbauter Raum 52000 m ³	
Material des Glasblockmantels Edelstahl Material des Glases Borosilikatglas Gewicht des Mantels 115 kg Gewicht des Borosilikatglases 405 kg Dichte des Borosilikatglases 2700 kg/m ³ Metalloide im Glas 58 kg/Glasblock * Gew.-% 12,8 Einlagerungszeitpunkt nach Reaktorentnahme 7 Jahre Aktivitätsinventar zum Zeitpunkt der Einlagerung 5 * 10 ¹⁶ Bq/Glasblock Dosisleistung eines Glasblockes an der Oberfläche 2 * 10 ⁵ rad/h		Lagerkapazität * Anzahl der Lagergestelle 10 * Anzahl der Lagerkörbe 7 neben- / 12 übereinander * Glasblöcke je Lagerkorb 3 liegend nebeneinander * Fassungsvermögen 2520 Glasblöcke * Lagerausnutzung 2 * 2500 Glasblöcke * Gleichwertige Brennelementmenge ca. 3200 t U _{gqv}	
Wärmeproduktion eines Glasblockes * zum Einlagerungszeitpunkt 1800 W (7 a nach Reaktorentnahme) Leistungsdichte 12000 W/m ³ Wärmestromdichte 1000 W/m ² Glasktemperaturen * max. zulässige 450 °C * max. Zentraltemperatur 370 °C (Betrieb) Wandtemperatur des Glasblockes 240 °C Verweilzeit in der Anlage 30 Jahre		max. Wärmeleistung 4,5 MW Kühlung (Zweikreisanlage) freie Konvektion Luft * Wärmeträger 0,8 bar * Betriebsdruck Temperaturen * Wärmerohre außen-Eintritt 30 °C * Wärmerohre außen-Austritt 60 °C * Lagergestell-Eintritt 70 °C * Lagergestell-Austritt 120 °C * Schachtwand (Beton) 120 °C	

Tab. 3-2: Auslegungsdaten des KWU-Zweikreis-Blocklagers
/3-10, 3-11, 3-12/

beitsmedium, welches durch Verdampfen an der warmen Seite und durch Kondensieren an der kalten Seite des Rohres ständig Wärme von der einen auf die andere Seite überträgt. Eine geringe Neigung der Wärmerohre zum warmen Ende hin unterstützt den Rückfluß des Kondensats innerhalb der Kapillarstruktur an der Innenwand durch die Schwerkraft, so daß eine optimale Wirkung erreicht wird. Durch ständigen Übergang von der Flüssigkeitsphase in die Dampfphase ist die Wärmeleistung bis 1000 mal größer als bei einem gleich dicken, massiven Kupferstab. Wärmerohre sind somit sehr gute Wärmeleiter, ihre Oberfläche hat überall fast die gleiche Temperatur, da der Temperaturgradient zwischen warmer und kalter Seite des Wärmeträgermediums weniger als 0,1 Grad C beträgt.

Sie arbeiten also mit ständiger innerer Bewegung von Dampf und Arbeitsflüssigkeit, jedoch ohne bewegte Teile und ohne einen Fremdenergiebedarf. Beispielhaft zeigt Bild 3-5 das Prinzip des Wärmerohres und seine Anwendung zum Wärmetransport von einem Fortluftstrom zu einem Frischluftstrom eines Wärmeprozesses.

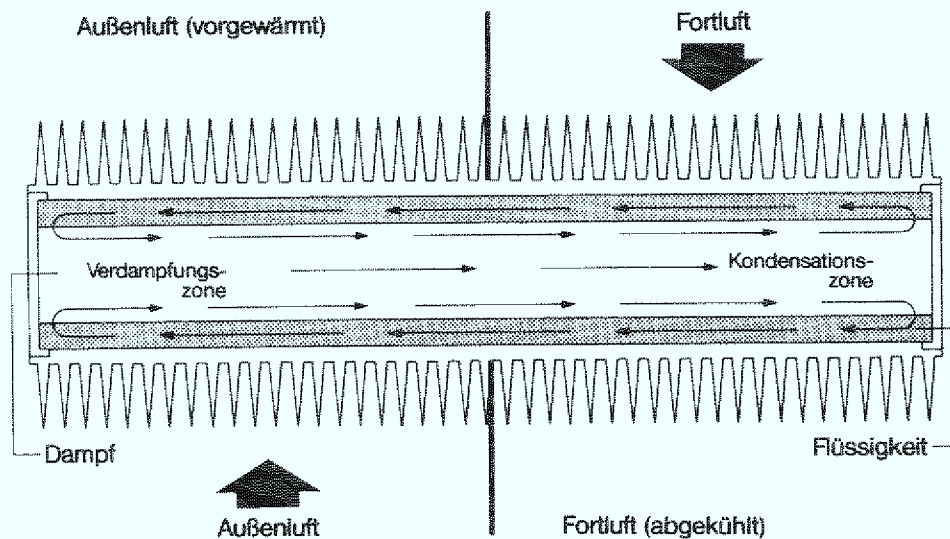


Bild 3-5: Arbeitsschema eines Wärmerohres /3-13/

Beim KWU-Blocklager erfolgt ihr Einbau in die Gebäudewand, wie in Bild 3-6 dargestellt. Den gasdichten Abschluß sowie den Schutz gegen Einwirkungen von außen für den Innenraum übernehmen in den Lagerbereich hineinragende, berippte Bajonettrohre, die in die Gebäudeaußenwand integriert sind. Das in das Bajonett hineinragende heiße Ende des Wärmerohrs ist unberippt. Der Ein- und Ausbau der Wärmerohre stellt keine Schwierigkeit dar. Die Verbindung zwischen Bajonettrohr und Wärmerohr übernimmt eine Flanschverbindung. Zur wärmetechnischen Kopplung von Bajonett- und Wärmerohr wird der Ringspalt mit einer niedrigschmelzenden Metallegierung verfüllt.

Im Normalbetrieb liegt die Metallegierung als Schmelze vor. Die Wärmeübergangsleistung beträgt 1,6 kW bei Temperaturen von $T(\text{innen})=80$ Grad C und $T(\text{außen})=32$ Grad C; als wärmeübertragendes Medium wird hier Wasser verwendet. Es sollen 10 Wärmerohrreihen übereinander angeordnet werden, wobei die Teilung aus Gründen der Gebäudestatik zwischen 300 und 400 mm liegt /3-14/.

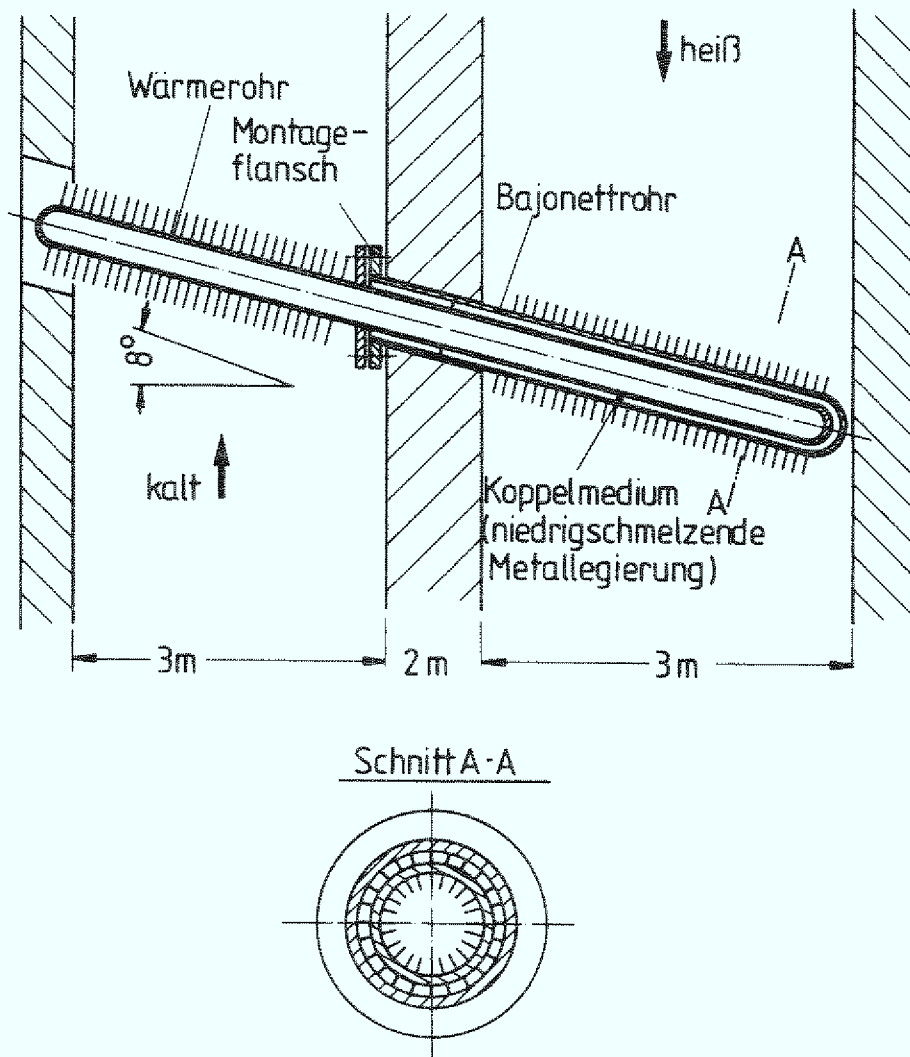


Bild 3-6: Wärmerohrausführung für KWU-Lager /3-14/

Die geometrischen Abmessungen des Wärmerohres betragen:

d(außen)	=	60 mm
s	=	3 mm
h(Rippe)	=	130 mm (Stabrippen)
l	=	8000 mm

Die Wirkung eines einzelnen Wärmerohres demonstriert die GEA (Bochum-Herne) seit ca. 1/2 Jahr an einem 1:1 Versuchsstand im Freigelände.

3.2.3.2 Langzeitig erhöhte Betontemperaturen

Kenntnisse über den Einfluß hoher Temperaturen auf die mechanischen Eigenschaften von Beton sind wichtig bei Bauwerken, von denen nach einer zeitlich begrenzten Temperatureinwirkung noch eine bestimmte Tragfähigkeit gefordert wird. Diese Anforderung kann auch für Bauwerke Gül-

tigkeit haben, die im Zuge ihrer betrieblichen Nutzung höheren Temperaturen ausgesetzt sind und gleichzeitig eine bestimmte Druckfestigkeit und somit Beständigkeit besitzen müssen.

Die den Temperaturlastfall betreffende Unsicherheit bei der Berechnung und Konstruktion hat vielfach den Eindruck aufkommen lassen, daß Betonkonstruktionen für Temperaturen, die höher als die natürlichen Temperaturen sind, nicht brauchbar seien. Aus diesem Grunde entstanden Temperaturgrenzen von 50 Grad C, die auch häufig als "zulässige Grenze" angesehen werden. Eine solch niedrige Grenze existiert jedoch nicht. Daher erfolgten in diesem Zusammenhang eingehende Untersuchungen, die die Änderung von Materialeigenschaften infolge von Temperaturen (Rißbildung, Kurzzeitkriechen) erfassen. Die Grenzen, bei denen die geforderte Sicherheit nicht mehr eingehalten werden kann, d.h. wenn z.B. die Betonstauchungen zu groß werden bzw. die Betonfestigkeit so vermindert ist, daß die Beanspruchungen nicht mehr sicher aufgenommen werden können, sind weder bei 50 Grad C noch bei 100 Grad C erreicht, sie liegen weit darüber /3-15, 3-16/.

Neben der Betonzusammensetzung hat die Aufheiz- bzw. Abkühlgeschwindigkeit einen Einfluß auf die Festigkeitswerte. Auch erhält man unterschiedliche Werte bei Messungen im warmen Zustand einerseits und im wieder abgekühlten Zustand andererseits. Werden mehrere Temperaturzyklen gefahren, so ergibt dies eine bleibende Festigkeitsverminderung. Der Abfall des Elastizitätsmoduls wird mit steigender Temperatur geringer.

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton ist ebenfalls temperaturabhängig. Bestimmte Betonarten besitzen im Bereich von 50 - 100 Grad C eine höhere Wärmeleitfähigkeit als das bei Normaltemperatur der Fall ist. Mit steigender Temperatur ist aber ebenfalls eine Abnahme festzustellen /3-16/.

Abschließend kann festgehalten werden, daß eine direkte Grenze für zulässige Betontemperaturen nicht angegeben werden kann. Bei höheren Temperaturen muß nachgewiesen werden, daß die geforderten Sicherheiten unter Beachtung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften gewährleistet werden können.

3.3 ZWEIKREIS-SICHERSTELLUNGSLAGER DER BBC MIT WÄRMENUTZUNG

3.3.1 TECHNISCHER AUFBAU

Das hier beschriebene externe Brennelement-Lager -Naßlager- (Bild 3-7, Tab. 3-3) hatte ursprünglich vielseitige Aufgaben zu erfüllen, u.a.:

- die Lagerung von 2900 ausgedienten BE bzw.
- die Lagerung von 3 * 1140 verglasten HAW-Behältern.

Die Anpassung dieses Lagerkonzeptes auf ein Sicherstellungslager für 2500 Glasblöcke ist unter Beibehaltung der Gebäudeanordnung, Raumaufteilung und Lagerbeckengröße möglich /3-17/.

Die sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten sind innerhalb des Lagergebäudes angeordnet. Es ist gegen Einwirkungen von außen ausgelegt und als Stahlbetonkonstruktion mit getrennten Innenstrukturen ausgeführt. Im Innern gliedert sich das Lagergebäude in den Lagerbereich, den Transportbereich sowie in den Versorgungsbereich. Um das Lagergebäude sind Naßkühltürme und luftgekühlte Wärmetauscher zur Nachzerfallswärmeabfuhr aufgestellt.

Sobald eines der vier Lagerbecken mit Glasblöcken gefüllt, drainiert und mit Betonriegeln nach oben abgedichtet ist, wird die Nachwärmeabfuhr auf freie Luftkonvektion mit Naturumlauf umgeschaltet. Bei der Nutzung des Lagers als Glasblock-Sicherstellungslager ist eine Wärmeleistung von 5 MW abzuführen. Dies wird realisiert durch Anpassung der Lagerbecken-Luftkühler und des Luftführungsraumes sowie einer gezielten Luftführung an den 3- bis 4-fach senkrecht übereinander gestapelten Glasblöcken mittels entsprechender Luftführungsbleche. Die Wärmetauscher des zweiten Kreislaufes sind entsprechend angepaßt. Die Warmlufttemperatur im Becken beträgt im Störfall max. 90 Grad C (Störfall: Ausfall von 2 von 3 Kühlelementgruppen).

Anstatt über die von der Umgebungsluft gekühlten Rückkühler kann die Nachzerfallwärme auch über eine Flüssig-Flüssig-Wärmetauschanlage zur Nutzwärmeauskopplung verwendet werden.

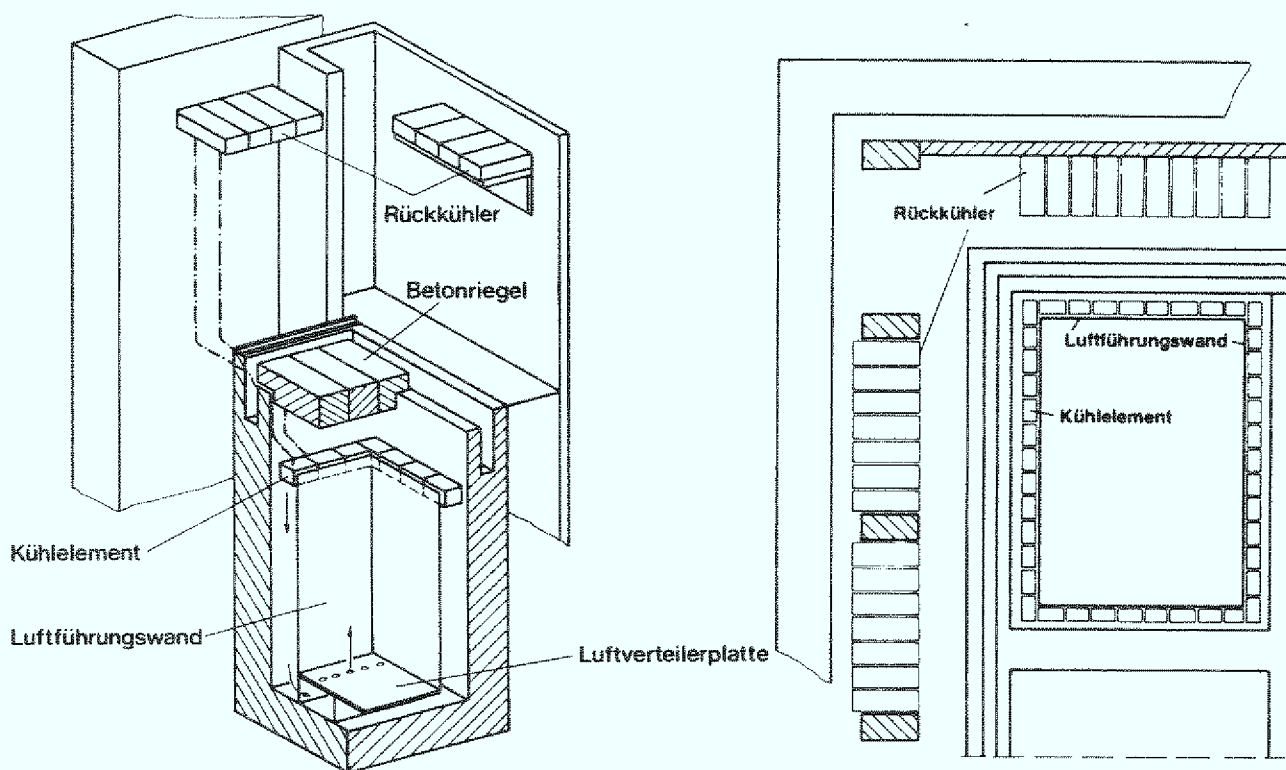


Bild 3-7: BBC-Sicherstellungslager zur BE- und Glasblocklagerung
links: Perspektive
rechts: Grundriß /3-17, 3-18/

Daten des Lagergutes		Daten der Anlage	
Abmessungen des Glasblockes * Typ COGEHA * Höhe 1345 mm * Durchmesser 430 mm * Wandstärke 5 mm * Inhalt 0,15 m ³		Gebäude Hauptabmessungen - Empfangsbereich * Länge 31 m * Breite 37 m * Höhe des Gebäudes 42 m über Erdreich 29 m - Lagerbereich * Länge 32 m * Breite 37 m * Höhe 42 m * Durchmesser * Überbaute Fläche 2630 m ² * Umbauter Raum 97500 m ³	
Material des Glasblockmantels Edelstahl Material des Glases Borosilikatglas Gewicht des Mantels 115 kg Gewicht des Borosilikatglases 405 kg Dichte des Borosilikatglases 2700 kg/m ³ Metalloxide im Glas 65 kg/Glasblock * Gew.-% 16 Einlagerungszeitpunkt nach Reaktorentnahme 6 Jahre Aktivitätsinventar zum Zeitpunkt der Einlagerung 5 * 10 ¹⁶ Bq/Glasblock Dosisleistung eines Glasblockes 2 * 105 rad/h an der Oberfläche		Lagerkapazität * Anzahl der Lagergestelle 3 * Anzahl der Lagerschächte 380 * Stapelung (übereinander) 3 Glasblöcke * Fassungsvermögen 3420 Glasblöcke * Lagerausnutzung 2500 Glasblöcke * gleichwertige Brennelementmenge 3200 t U _{gq}	
Wärmeproduktion eines Glasblockes * zum Einlagerungszeitpunkt 2000 W ((1) a nach Reaktorentnahme) Leistungsichte 14000 W/m ³ Wärmestromdichte 1100 W/m ² Glasktemperaturen * max. zulässige ca. 450 °C * max. Zentraltemperatur < 450 °C (Betrieb) Wandtemperatur des Glasblockes (1) Verweilzeit in der Anlage (1)		max. Wärmeleistung 5 MW Kühlung mit Wärmenutzung * Wärmeträger Luft-flüssig-flüssig * Betriebsdruck Luft/Flüssigkeit drucklos * Massenstrom (1) * Luftdurchsatz (1) Temperaturen * Lufteintritt (1) * Luftaustritt 70 °C * Lagerzelle/-behälter max. 90 °C	

Tab. 3-3: Auslegungsdaten des BBC-Sicherstellungslagers /3-17, 3-18/
(1) Daten nicht bekannt

Ausgehend von einer Anlagenleistung von 5 MW und einer Abklingrate auf ca. 2 MW nach 20 Jahren ergibt dies eine auskoppelbare Nutzwärme von ca. $6 \cdot 10^8$ kWh, was etwa 50 Mio l Heizöl oder etwa 30 Mio DM entspricht.

Die Anpaßbarkeit auf Lagerung von Glasblöcken ist als eine weitere Variante des Konzeptes zu betrachten. Wäre die Zielsetzung eine ausschließliche Glasblock-Lagerung von Errichtungsbeginn an, so könnten am Hauptgebäude der Versorgungsbereich, für den die anfängliche BE-Lagerung auslegungsbestimmend ist, um etwa $2/3$, der Bau um etwa $1/3$ reduziert werden sowie einige periphere Gebäude gänzlich entfallen $/3-18/$.

3.3.2 SICHERHEITSTECHNISCHE MERKMALE

Das hier beschriebene Lagerkonzept geht von Glasblöcken mit einer hohen Nachwärmeleistung aus. Daher ist in diesem Fall zuerst die Einlagerung in Lagerbecken mit Wasserkühlung vorgesehen. Nach dem Abfall der Wärmeleistung wird die Kühlung durch gerichtete Luftführung übernommen. Inwieweit bei einer Leistung von 2 kW/Glasblock bzw. 5 MW/Lager das Prinzip der Wasserkühlung eingesetzt werden müßte, ist vom Hersteller noch zu prüfen.

Bei Einsatz der Wasserkühlung erfolgt die Wärmeabgabe nach folgendem Prinzip:

Die an das Wasser abgegebene Nachzerfallswärme wird über $3 \cdot 50\%$ Lagerbecken-Kühlsysteme, die ebenfalls 3-fach vorhandenen Zwischenkühlwassersysteme und die Hauptkühlwassersysteme an die Umgebung abgeführt.

Das zur Kühlung notwendige Wasser wird über Filter gereinigt. Die dabei anfallenden Ionentauscherharze und Regenerierwässer müssen endlagerfähig verarbeitet werden $/3-20/$.

3.3.3 SPEZIFISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUM BBC-ZWEIKREIS-SICHERSTELLUNGLAGER

Dieses Sicherstellungslager für HAW-Glasblöcke wurde aus einem Naßlager für abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren unter Beibehaltung der sicherheitstechnischen Einrichtungen sowie der Gebäude- und Raumaufteilung entwickelt. Daher sind alle für Naßlager spezifischen Einbauten wie Beckenwasserfilteranlagen, redundante notstromgesicherte Beckenwasserkühlkreisläufe in getrennten Gebäuden, Beckenauskleidung mit Lecküberwachung etc. vorgesehen, wodurch die Erstellungs-, Betriebs-, Überwachungs- und Instandhaltungskosten sehr hoch sind. Die angesprochenen Kosten sind zwar nicht durch Zahlenangaben des Konzepterstellers belegt, jedoch lassen sich hierzu die bekannten Schätzkosten für das ehemals am Standort Ahaus geplante Lager der STEAG heranziehen.

In der Tabelle 10-3 ist das Lagerbecken (vgl. Bild 3-7a), welches nach Abschluß der Beladung durch Betonriegel gasdicht abgedeckt werden soll, als Radioaktivitätsbarriere ausgewiesen. Zur genaueren Beurteilung dieses gasdichten Abschlusses wäre erstens zu klären, inwieweit die Gasdichtheit

im Normalbetrieb gewährleistet werden kann und zweitens, wie sich die Dichtelemente bei erhöhten Störfalltemperaturen verhalten. Die genannten Fragestellungen sind neben der Beurteilung der Barriere "Lagerbecken" auch für eine sorgfältige Betrachtung des zur Kühlung der Glasblöcke innerhalb des Lagerbeckens notwendigen Naturzugkreislaufs wesentlich, denn im Falle größerer, unbemerkter Leckagen könnte der Kühlkreislauf derart beeinflusst werden, daß eine partielle Überhitzung der Glasblöcke im Lagerbecken nicht auszuschließen ist.

3.4 ZWEIKREIS-ÜBERGANGSLAGER DER BBC

3.4.1 TECHNISCHER AUFBAU

Das luftgekühlte Zwischenlager nach dem Tunnelkonzept ist für gekapselte Brennelemente und Glasblöcke ausgelegt (Bild 3-8, Tab. 3-4) /3-18 bis 3-20/.

In diesem Glasblock-Trockenlager werden 2500 Glasblöcke in zwei parallel angeordneten, scheibenförmigen Lagersektionen untergebracht. Je 6 Glasblöcke sind in 2 Reihen mit je 3 Behältern hintereinander auf einer Palette angeordnet. 18 Wagen füllen eine Etage einer Sektion aus. Die Schienen der Lageretagen sind übereinander an den senkrechten Wänden befestigt. Je Sektion sind 13 Lageretagen vorhanden.

Die Kühlung der Glasblöcke erfolgt durch einen geschlossenen Luftkreislauf mit natürlicher Konvektion. Die horizontal übereinander liegenden Glasblöcke bilden ein Heizregister.

Sinnvollerweise belädt man etagenweise von oben beginnend, um einmal die Wärme über die Länge des Lagerbereiches gleichmäßig zu verteilen und zum anderen, um den zuletzt eingeladenen Glasblöcken die kälteste Luft zuzuführen. Abnehmbare Verschlüsse sorgen für die Vermeidung von seitlichen Wärmelecks.

Die vom Lagergut erwärmte Luft weicht durch Öffnungen in den Seitenwänden oben zur Seite aus und wird durch Wärmerohrbatterien, die in der Gebäudeaußenwand installiert sind, rückgekühlt. Die Wärmerohre geben die aufgenommene Wärme im Naturzug an die Außenluft ab. Die gekühlte Innenluft wird zum Fuße des Lagers geführt, wo sie über seitliche Öffnungen wieder in die Lagerschächte eintritt.

Die in den Beladerraum eindringende Wärme wird ebenfalls über einen Kreislauf mit Wärmerohren abgeführt. Die kalte Luft gelangt unter den Maschinenboden und steigt durch darin vorgesehene Öffnungen auf. Dabei wird auch die Wärme von im Beladerraum befindlichen Paletten mit frischen Glasblöcken abgeführt.

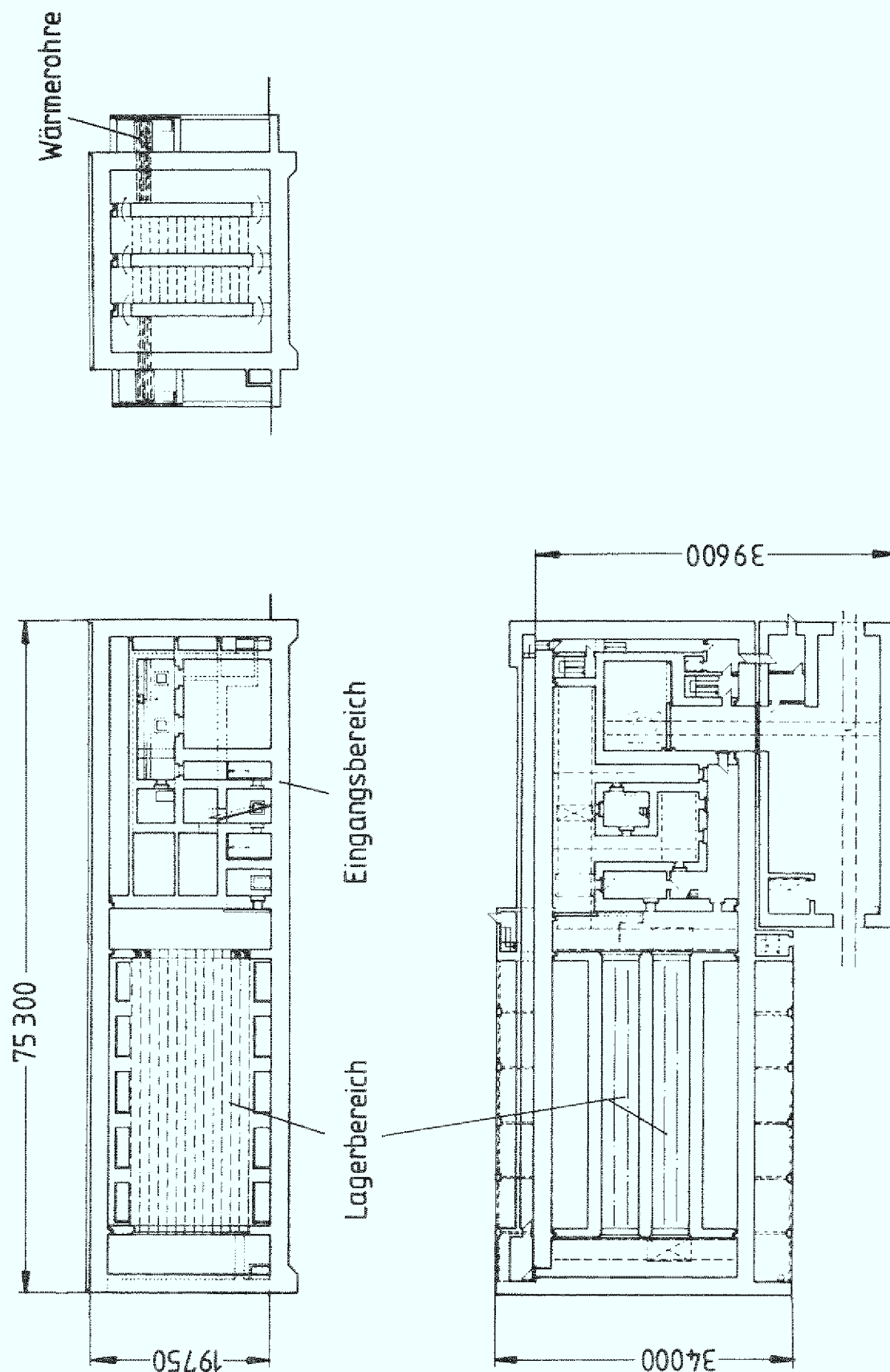


Bild 3-8: BBC-Übergangslager zur Aufnahme von BE und Glasblöcken
/3-18, 3-19/

Daten des Lagergutes		Daten der Anlage	
Abmessungen der Glasblöcke * Typ COGEMA * Höhe 1335 mm * Durchmesser 430 mm * Wandstärke 5 mm * Inhalt 0,15 m ³		Gebäude Hauptabmessungen - Empfangsbereich * Länge 50 m * Breite 25 m * Höhe des Gebäudes 20 m über Erdreich 20 m - Lagerbereich * Länge 43 m * Breite 25 m * Höhe 20 m * Durchmesser * überbaute Fläche 2360 m ² * Umbauter Raum 44250 m ³	
Material des Glasblockmantels Material des Glases Edelstahl Gewicht des Mantels Borosilikatglas 115 kg Gewicht des Borosilikatglases 405 kg Dichte des Borosilikatglases 2700 kg/m ³ Metalloxide im Glas 65 kg/Glasblock * Gew.-% 16 Einlagerungszeitpunkt nach Reaktorenentnahme 6 Jahre Aktivitätsinventar zum Zeit- punkt der Einlagerung 5 * 10 ¹⁶ Bq/Glasblock Dosisleistung eines Glasblockes 2 * 10 ⁵ rad/h an der Oberfläche		Lagerkapazität * Anzahl der Lageretagen 2 * 13 * Lagerwagen pro Etage 17 * Glasblöcke pro Lagerwagen 2 * 3 * Fassungsvermögen 2800 Glasblöcke * Lagerausnutzung 2500 Glasblöcke * gleichwertige Brennelementmenge 3200 t U _{eqv}	
Wärmeproduktion eines Glasblockes * zum Einlagerungszeitpunkt 2000 W (7 a nach Reaktorenentnahme) * 10 a nach Reaktorenentnahme Leistungsdichte 14000 W/m ³ Wärmestromdichte 1100 W/m ² Glasteperaturen * max. zulässige 450 °C * max. Zentraltemperatur < 450 °C (Betrieb) Wandtemperatur des Glasblockes (1) Verweilzeit in der Anlage (1)		max. Wärmeleistung 5 MW Kühlung (Zweikreisanlage) freie Konvektion * Wärmeträger Luft * Betriebsdruck drucklos Temperaturen * Wärmerohre außen-Eintritt 30 °C * Wärmerohre außen-Austritt 64 °C * Lagergestell-Eintritt 35 °C * Lagergestell-Austritt 70 °C * Schachtwand (Beton) 70 °C	

Tab. 3-4: Auslegungsdaten des BBC-Übergangslagers /3-18, 3-19/
(1) Daten nicht bekannt

Die Hallendecke hat einen gesonderten Teil-Kühlkreislauf, wobei kalte Luft aus der Lagerzone direkt in einen Zwischenraum unter der Decke geleitet wird, wo sie sich nach Erwärmung mit anderer, abströmender Luft vermischt.

Die nach Dichtigkeitsprüfung und ggf. äußerer Dekontamination auf einem Palettenwagen befestigten Glaskokillen werden in den vorderen Beschickungsraum gefahren und vom Spindelaufzug übernommen. Die Palette wird mit dem Spindelaufzug vor die zu beschickende Lageretage gefahren. Eine Vorrichtung auf der Hubplattform des Spindelaufzuges entfernt den Etagenverschluß, die Schienen von der Hubplattform zur Etage werden überbrückt und der Palettenwagen mittels einer Schubvorrichtung in die Etage eingefahren.

Zur gleichen Zeit befindet sich die Plattform des hinteren Spindelaufzuges am Ausgang derselben Etage. Diese hat den hinteren Etagenverschluß geöffnet und die Schienenüberbrückung hergestellt. Da die Etage stets mit Paletten gefüllt ist -leere oder volle-, wird beim Einschieben einer vollen Palette gleichzeitig eine leere am hinteren Ende hinausgedrückt. Beide Verschlüsse der beschickten Etage werden nun wieder eingesetzt. Die leere Palette wird über die unterste Etage in den vorderen Beschickungsraum eingeschleust und beladen. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zur vollständigen Belegung aller Etagen.

3.4.2 SICHERHEITSTECHNISCHE MERKMALE

Für das BBC-Blocklager nach dem Tunnelkonzept sind für die Belastungspfade Kontamination und Inkorporation die gleichen Anforderungen zu stellen, wie bereits im Kap. 3.1.2 für das NUKEM-Lager beschrieben.

Das angewandte Kühlprinzip ist in der technischen Beschreibung des Lagers erläutert. Es handelt sich hierbei ebenfalls um eine Zweikreisanlage (ähnlich KWU-Lager):

- innerer Naturkonvektionskreislauf (Wärmeabfuhr an Wärmerohre)
- äußerer Naturkonvektionskreislauf (Wärmeabfuhr von den Wärmerohren an die Umgebungsluft)

Da das Lagergut im gesamten Lagerbereich ausschließlich unterstützt transportiert und gelagert wird und keinerlei hängende Beförderung stattfindet, ist ein Absturz als innerer Störfall auszuschließen /3-21/.

3.4.3 SPEZIFISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUM BBC-ZWEIKREIS-ÜBERGANGSLAGER

Das Trockenlager der BBC verfügt im Lagerbereich über annähernd den gleichen Aufbau wie das Zweikreis-Blocklager der KWU. Da auch hier die Wärmeabfuhr über zwei hintereinandergeschaltete Naturkonvektionskreise erfolgt, die durch Wärmerohre miteinander gekoppelt sind, gelten die Ausführungen zum Wärmerohr (Kap. 3.2.3.1) entsprechend. Im Vergleich zum

KWU-Konzept sollen die maximalen Betontemperaturen hier aber auf 75 Grad C begrenzt bleiben.

3.5 BEHÄLTERLAGER ZUR AUFNAHME VON HAW-GLASBLÖCKEN

3.5.1 TECHNISCHER AUFBAU

Die Lager-/Transportbehälter (LTB) aus Gußstahl GGG-40 (Sphäroguß mit einer Zugfestigkeit von 40 kp/mm²) enthalten kein flüssiges Kühlmedium. Da sie auch zum Transport von abgebrannten Brennelementen bzw. HAW-Glaskokillen verwendet werden können, müssen sie entsprechend den international gültigen Richtlinien für den Transport radioaktiver Stoffe den strengen Qualitätsanforderungen und Qualitätsprüfungen für Transportbehälter für abgebrannte Brennelemente (Kategorie Typ B(U)) unterworfen werden.

Die LTB (CASTOR), deren Lagerquerschnitte quadratisch sind, wurden im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH (DWK), von der Steinkohlen-Elektrizitäts AG (STEAG) und der Gesellschaft für Nuclear Service mbH (GNS) entwickelt. Ein LTB (Typ CASTOR) zur Einlagerung von Druckwasser- bzw. Siedewasserbrennelementen ist im Bild 3-9 dargestellt. Zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken entwickelten die beteiligten Firmen den LTB "Typ-Pollux". Dieser Behälter besitzt einen kreisförmigen Lagerquerschnitt, in dem sich die HAW-Glasblöcke in einem Einsatzkorb befinden. Die Daten des LTB "Pollux" sind in der Tabelle 3-5 aufgeführt.

Der LTB vom Typ CASTOR wurde bereits den Prüfungen nach IAEA-Richtlinien unterzogen und zugelassen /3-10/.

Auch die Transnuklear (TN) entwickelte einen LTB (TN-1300) zur Aufnahme von Brennelementen (Bild 3-10). Er besteht im Grundkörper ebenfalls aus Sphäroguß. Dieser Behälter wird in Standardgrößen mit kreisförmigem Querschnitt hergestellt und mit einer Neutronenabschirmung versehen, die außen angebracht und bei Bedarf (z.B. Wiederholungsprüfung) abnehmbar ist. Von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) erhielt der LTB die verkehrsrechtliche Zulassung Typ B(U), nachdem die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) den Behälter sicherheitstechnisch begutachtet hatte /3-22/.

Die Transnuklear entwickelt auf der Basis des TN-1300 ebenfalls einen LTB zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken. Die technischen Daten des Behälters sind in der Tabelle 3-5 aufgeführt.

Die beschriebenen LTB werden einschließlich Deckel und Anordnung von Dichtungen so ausgelegt, daß der Schutz der Umwelt auch bei Störfällen und Einwirkungen von außen gewährleistet ist. Daher haben die Lagerhallen für die Aufnahme der LTB keine sicherheitstechnischen Funktionen. Sie werden in leichter Bauweise ausgeführt und nicht gegen Einwirkungen von außen

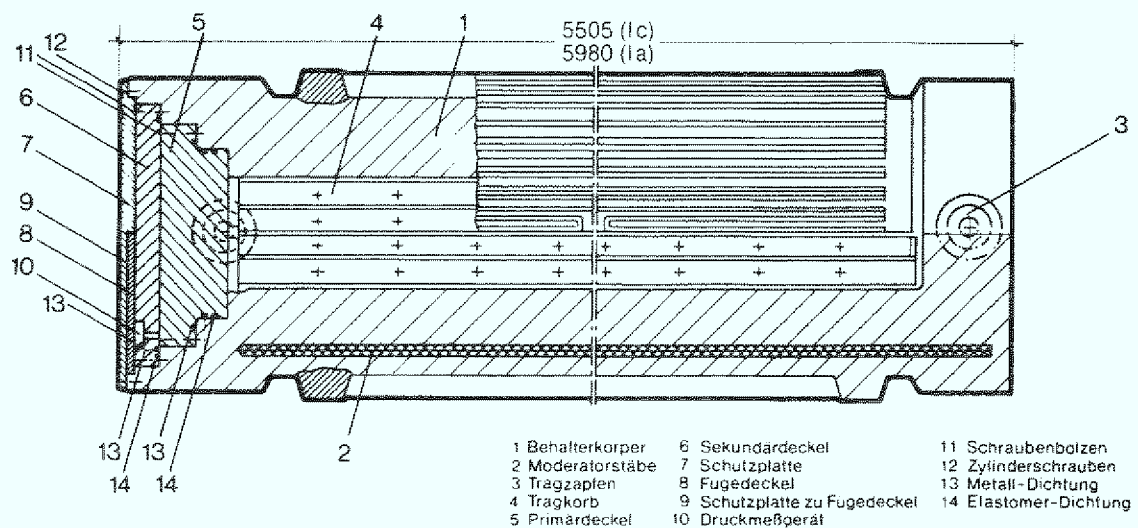


Bild 3-9: Lager/Transport-Behälter vom Typ CASTOR zur Einlagerung von BE /3-10/

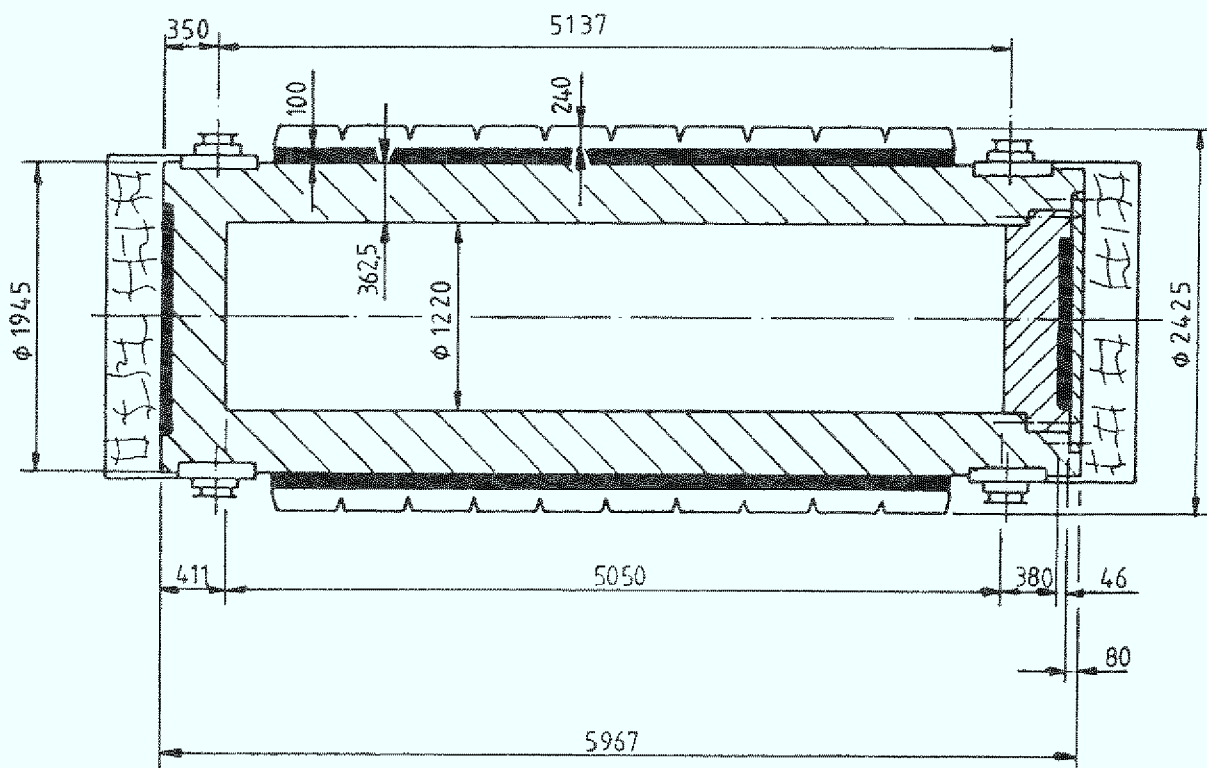


Bild 3-10: Lager/Transport-Behälter der Transnuklear (TN 1300) zur Einlagerung von BE /3-22/

Daten des Lagergutes		Daten der Anlage	
Transportbehälteranbieter Abmessungen der Glasblöcke * Typ * Höhe * Durchmesser * Wandstärke * Inhalt		Gebäude Hauptabmessungen * Länge * Breite * Höhe des Gebäudes * Überbaute Fläche * Umbauter Raum	
Transnuklear/GNS COGEMA 1335 mm 430 mm 5 mm 0,15 m ³		182 m 38 m 20 m 6950 m ² 139000 m ³	
Material des Glasblockmantels Material des Glases Gewicht des Mantels Gewicht des Borosilikatglases Dichte des Borosilikatglases Metalloide im Glas * Gew.-% Einlagerungszeitpunkt nach Reaktorentnahme Aktivitätsinventar zum Zeit- punkt der Einlagerung Dosisleistung eines Glasblockes an der Oberfläche		TN 1300 (TN) / Pollux (GNS) Anzahl der Glasblöcke je LTB Glasblöcke in einer Ebene LTB je Lager Glasblöcke je Lager Brennelementmenge LTB-Gewicht Länge des LTB * Innen * Außen Durchmesser des LTB * Innen * Außen	
Edelstahl Borosilikatglas 115 kg 405 kg 2700 kg/m ³ 58 kg/Glasblock 12,8 7 Jahre 5 * 10 ¹⁶ Bq/Glasblock 2 * 10 ⁵ rad/h		21 / 21 / 7 240 / 240 5040 / 5040 6720 / 6720 t U _{eqv} 122 / (1) t / (1) mm 6420 / (1) mm 1893 / (1) mm 2593 / (1) mm	
Wärmeproduktion eines Glasblockes * zum Einlagerungszeitpunkt (7 a nach Reaktorentnahme) Leistungsichte Wärmestromdichte Glasteperaturen * max. zulässige * max. Zentraltemperatur Wandtemperatur des Glasblockes Verweilzeit in der Anlage		max. LTB-Wärmeleistung mögliche LTB-Abwärmeleistung max. Wärmeleistung der Anlage Kühlung Wärmeträger Behältertemperatur Innen Behältertemperatur Außen Kühllufttemperatur Innen Kühllufttemperatur Außen	
2530/ 2000 W 17000/14000 W/m ³ 1400/ 1100 W/m ² 450 °C 425 °C (1) 40 Jahre		53 / 42 kW -- / -- kW 24 / 19 MW Naturkonvektion Luft (1) / (1) °C (1) / (1) °C (1) / (1) °C (1) / (1) °C	

Tabelle 3-5: Auslegungsdaten eines Behälterlagers zur Aufnahme von HAW-Glasblöcken /3-23, 3-24/ (Behältertyp: Pollux GNS und TN-1300 der Transnuklear)
 (1) Daten nicht bekannt

ausgelegt. Die Luft, die die Lagerhalle durchströmt, dient zur Kühlung der in ihr aufgestellten LTB.

Die Lagerkapazität einer Lagerhalle, ausgedrückt in Tonnen Schwermetall ($t(SM)$), richtet sich vor allem nach dem Typ des verwendeten Lager-/Transportbehälters und nach der Anzahl von Standplätzen für diese Behälter in der Lagerhalle.

In Bild 3-11 ist beispielhaft eine Lagerhalle dargestellt. Sie enthält Bereiche für

- die Abfertigung der Transportfahrzeuge für die LTB,
- die Abstellpositionen für die Behälter,
- eine Servicestation,
- notwendige Hilfs- und Nebenanlagen sowie
- Sozialräume für das Personal /3-10/.

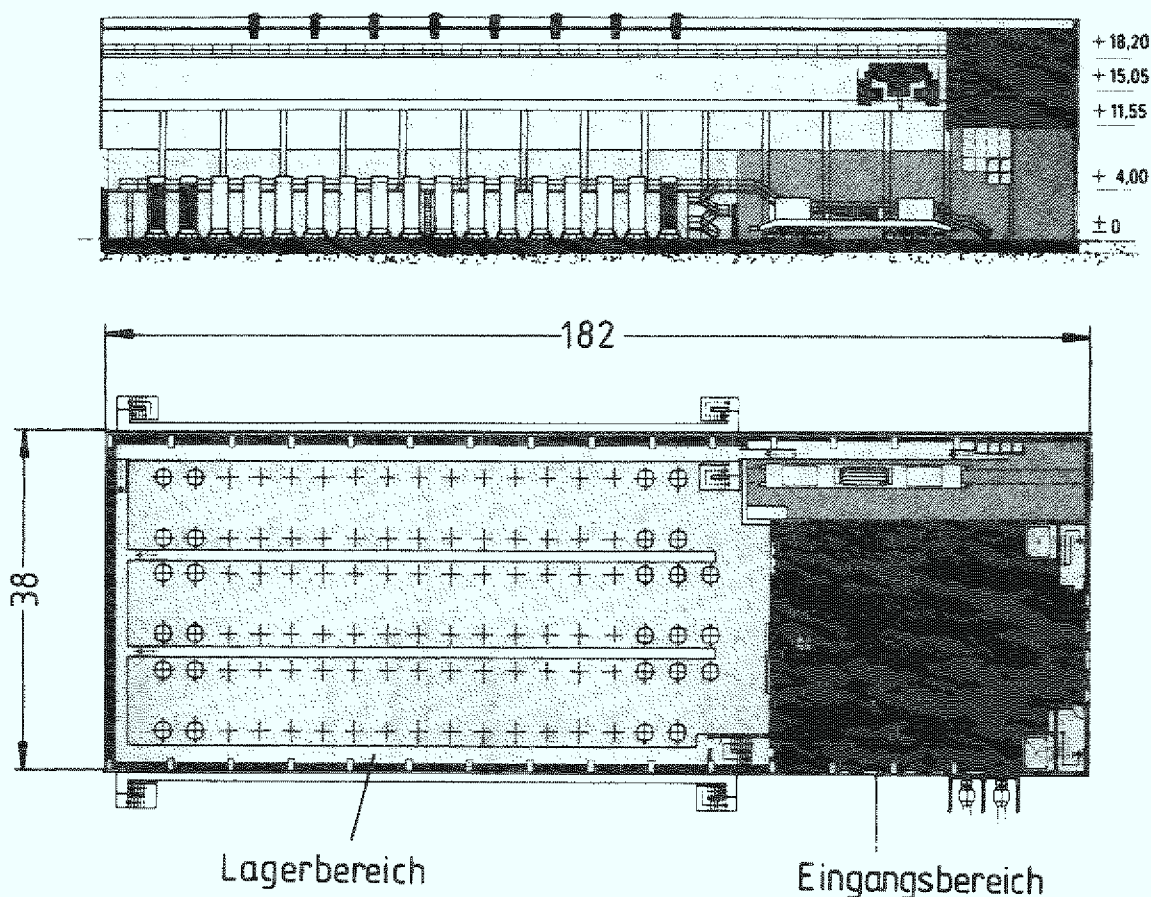


Bild 3-11: Beispiel einer Lagerhalle für BE-Lager/Transportbehälter
(Grundriß) /3-10/

Am 6.9.1983 hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) als Genehmigungsbehörde für das Brennelement-Zwischenlager in Gorleben die Aufbewahrungsgenehmigung gemäß § 6 Atomgesetz für 40 Jahre an die Brennelementlager Gorleben GmbH (BLG), eine Tochtergesellschaft der DWK, erteilt.

Die Aufbewahrungsgenehmigung beinhaltet, daß der Betreiber des Zwischenlagers in der Behälter-Lagerhalle abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren mit 1.500 Tonnen Uran in 420 Behältern vom Typ Castor aufbewahren und die für diese Aufbewahrung notwendigen Handhabungen vornehmen kann.

Bezugnehmend auf die Genehmigung des Brennelement-Zwischenlagers und unter der Voraussetzung, daß die LTB für die Aufnahme von HAW-Glasblöcken genehmigt werden, könnten in dem oben angesprochenen Lager ca. 8820 HAW-Glasblöcke (21 HAW-Glasblöcke je LTB) gelagert werden. Von der STEAG wurden bereits Studien erstellt, die für ein HAW-Behälter-Lager 240 Stellplätze vorsehen, dies entspricht etwa 4.800 HAW-Glasblöcken.

3.5.2 SICHERHEITSTECHNISCHE MERKMALE

Die für die trockene Lagerung ausgedienter Brennelemente bzw. von Glasblöcken vorgesehenen Transportbehälter müssen der Typ B(U)-Bauartmuster-Zulassung genügen. Für diese Zulassung muß jeder Transportbehälter folgende Tests unbeschadet überstehen:

- Fallversuch I: Der Versuchsbehälter fällt aus 9 m Höhe auf eine unnachgiebige Stahl-Betonplatte. Dieses unnachgiebige Fundament besteht aus einem 1000 t Beton-Sockel, auf dem eine 35 t schwere Stahlplatte lagert.
- Fallversuch II: Der Behälter fällt aus 1 m Höhe auf einen Stahldorn.
- Feuertest: Der Behälter wird eine halbe Stunde lang einem Brand mit einer Temperatur von 800 Grad C ausgesetzt.

Der Transportbehälter ist am Deckel mit drei hintereinandergeschalteten Dichtungen (1 radiale, 2 axiale) ausgerüstet. Die Axialdichtungen sind als Elastomerdichtungen ausgeführt. Für die radiale Dichtung des Lagerbehälters ist eine Metalledichtung vorgesehen, wie sie bereits in ähnlicher Bauart in der Reaktortechnik Anwendung findet. Metalledichtungen garantieren erfahrungsgemäß eine besonders gute Langzeitbeständigkeit. Für dieses Dichtungssystem aus drei hintereinandergeschalteten Einzeldichtungen beträgt die effektive Leckrate ca. $10^{(-7)}$ mbarl/s. Beim Helium-Lecktest nach den Fallversuchen wurden keine Leckagen festgestellt.

Nach diesen drei Versuchen haben Dichtigkeitsprüfungen nachgewiesen, daß der Prüfbehälter nach wie vor dicht war und auch in 15 m Wassertiefe nach 8 Stunden kein Leck zeigte. Zusätzlich wurden untersucht:

- das mechanische Verhalten des Behälters bei niedrigen Temperaturen (-40 Grad C). Mehrere Fallversuche aus 9 m Höhe auf eine harte Aufprallplatte gehörten zu diesem Test.
- das Verhalten des Behälters bei Beschuß.

Der Transportbehälter überstand diese umfangreichen Versuche, ohne daß die Stabilität oder Dichtheit des Behälters beeinflußt wurde. Der Fallversuch I (9 m Höhe) ist der härteste Test, dem ein Behälter bisher in der Technik unterzogen wurde, denn durch die unnachgiebige Stahl-Betonplatte werden so hohe Aufprallkräfte erzeugt, wie sie in der Praxis normalerweise

nicht auftreten. Das bedeutet, daß diese Fallversuche wesentlich höheren Fallhöhen auf normales Straßenfundament oder Erdreich entsprechen.

Durch die beschriebene Konstruktion des Transportbehälters ist gewährleistet, daß der Behälter bei denkbaren äußeren Einwirkungen stabil und dicht bleibt. In jedem Falle bleibt die Strahlenbelastung unter den zulässigen Werten. Feuer, Druckwellen durch Explosionen, heftige Stöße durch Erdbeben oder Wassereinwirkung durch Überschwemmungen können dem Transportbehälter nichts anhaben. Alle diese Einwirkungsmöglichkeiten sind in den Testreihen berücksichtigt worden.

3.5.3 SPEZIFISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUM BEHÄLTERLAGER

Da beim Transport- und Lagerbehälter die Sphärogußwand gleichzeitig Barriere gegen Aktivitätsaustritt und Schutz gegen Einwirkungen von außen ist, hätte ihre Zerstörung gravierende Folgen. Obwohl im Zulassungsverfahren (Typ B(U)) harte Versuchsbedingungen erfolgreich überstanden wurden, sind darüber hinausgehende Einwirkungen von außen möglich, die eine Zerstörung der Barriere "Behälterwand" bewirken. So sind Sabotageakte mit einfach zu handhabenden panzerbrechenden Waffen durchaus denkbar.

Die Wirkungsweise von Hohlladungen /3-25/ verdeutlicht Bild 3-12. Wesentliche Bestandteile von Hohlladungen sind der Detonator, die Hauptladung und die Einlage. Die Einlage wird nach der Zündung durch die Wirkung der einfallenden Detonationswelle bei einem Druck von mehr als 10^5 bar so verformt, daß sie in der Ladungsachse zusammengedrückt wird (Bild 3-12b).

Die von der Detonation erfaßten Einlagebereiche sind nahezu geradlinig abgelenkt. Sie teilen sich nun auf in den Stachel, der mit Geschwindigkeiten von bis zu 10^5 m/s aus dem Ladungshohlraum austritt, und den Stößel, der nur einige 100 m/s Geschwindigkeit in der gleichen Richtung hat. Die panzerbrechende Wirkung der Ladung wird vom Stachel hervorgerufen, der Stößel trägt dazu nicht bei.

Der mit der Geschwindigkeit $v(\text{Stachel})$ auf das Ziel auftreffende Hohlladungsstachel verdrängt dieses Material und verbraucht sich dabei (Bild 3-12c). Die Hohlladung wandert mit der Geschwindigkeit u in das Ziel. Werden die Lochbodengeschwindigkeit als konstant und der Eindringungsvorgang als stationär angenommen, stößt für den mit dem Lochboden bewegten Beobachter das Zielmaterial von rechts mit u und das Stachelmateriale von links mit $(v(\text{Stachel}) - u)$ zusammen.

Für den Stachel am Lochboden gilt:

$$1/2 \rho(\text{Stachel}) \cdot (v(\text{Stachel}) - u)^2 = 1/2 \rho(\text{Ziel}) \cdot u^2$$

wobei $\rho(\text{Stachel})$ die Dichte des Stachelmateriale und $\rho(\text{Ziel})$ die Dichte des Zielmateriale ist.

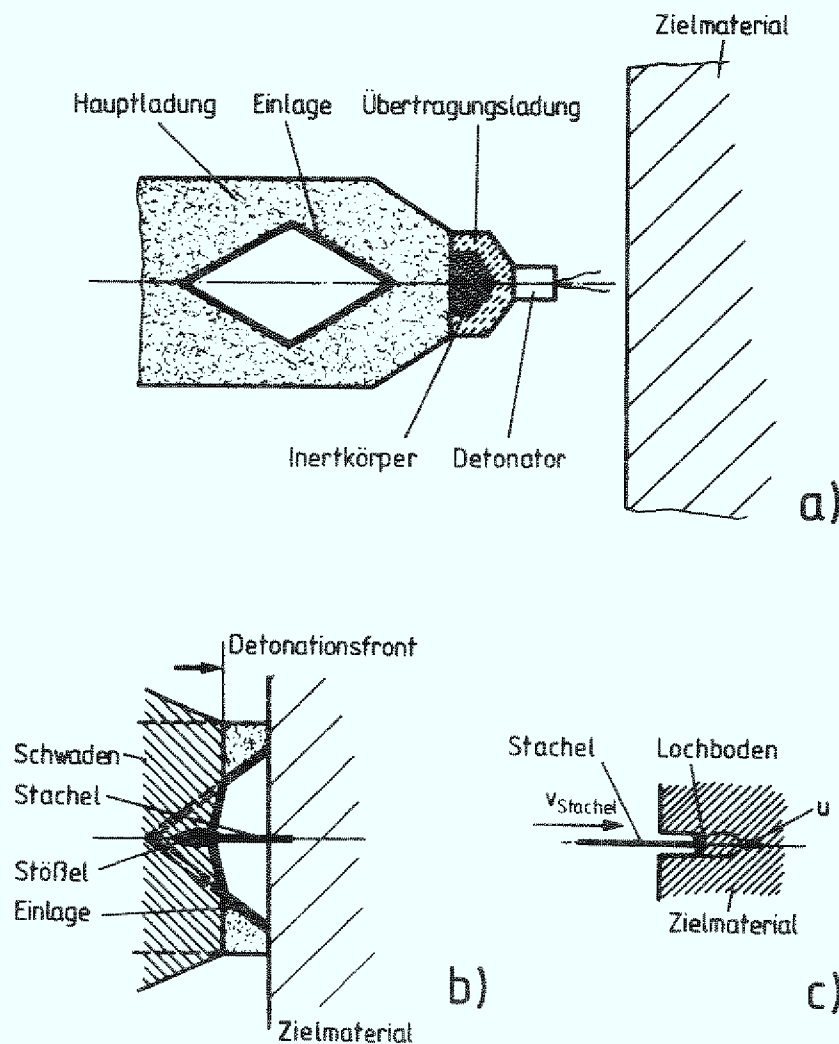


Bild 3-12: Wirkung einer Hohlladung /3-24/

- a) prinzipieller Aufbau
- b) Situation bei Aufprall und Detonation
- c) Eindringvorgang des Stachels

Nach dieser Gleichung führen Kupfer als Einlagematerial und Stahl als Zielmaterial je nach Stachelgeschwindigkeit zu Lochbodengeschwindigkeiten von $2500 \text{ m/s} < u < 3000 \text{ m/s}$.

Mit serienmäßig hergestellten Hohlladungen moderner Entwicklung werden mehr als sechs Einlagedurchmesser Panzerstahl durchschlagen. Von besonders hochgezüchteten Versuchsladungen werden Eindringtiefen bis zu 10 Einlagedurchmesser berichtet. Hohlladungen durchdringen Wanddicken bis zu 1000 mm. Kleinere Hohlräume können durch geeignete Wahl der Waffen überbrückt werden.

Die Zerstörungen im Innenraum entstehen durch den

- hohen Druck,
- die große Geschwindigkeit der eindringenden Partikel und
- die hohen Temperaturen.

Auf den Lager-/Transportbehälter übertragen bedeutet dies, daß das Abfeuern einer mittelschweren Hohlladung zum Durchdringen der Behälterwand (30-40 cm) mit nachfolgender Zerstörung des Inventars führt. Das gas- und staubförmige Inventar gelangt dann durch die geschaffene Öffnung und den durch die Hohlladung aufgebauten Innendruck in die Umgebung.

4. ANLAGENBESCHREIBUNG DES ÜBERGANGSLAGERS

Das Konzept des Übergangslagers orientiert sich an den hohen Anforderungen der Kernenergie. Insbesondere wurden dabei Ergebnisse aus der Diskussion bereits bestehender Lagerkonzepte (vgl. Kap. 3) berücksichtigt.

Das Übergangslager (Bild 4-1, 4-2a und 4-2b) dient der sicheren Verwahrung verglaster hochradioaktiver Spaltprodukte und besteht aus einem Stahlgußbehälter zur Aufnahme von 450 Glasblöcken und einem Betongebäude zum Schutz des Behälters gegen äußere Einwirkungen. Die verglasten Spaltprodukte sind in zylindrischen, gasdicht verschweißten Edelstahlkannen eingeschlossen.

Von der COGEMA werden ab 1990 jährlich 225 Glasblöcke angeliefert, dies entspricht etwa einem Glasblock pro Arbeitstag. Sie werden in speziellen Transportbehältern von der Verglasungsanlage zum Übergangslager transportiert.

Das Lagergut wird von der Übernahmestation aus, in der das Ausschleusen der Glasblöcke aus dem Transportbehälter erfolgt, in den Lagerbereich eingebracht. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Glasblock in einer internen Transportflasche. Mit Hilfe des Hallenkrans erfolgt die Einschleusung des Glasblockes in die Lagerschächte des Behälters.

Als Nachzerfallswärmeabfuhrsystem (Betriebskühlsystem) sind 48 Doppelrohrwärmetauscher installiert. Die dabei gewonnene Wärme wird über einen Trennwärmetauscher in ein Verbrauchernetz eingespeist.

Der Stahlgußlagerbehälter hat einen Durchmesser von 5.850 mm und eine Höhe von 20.800 mm, die Oberkante des Stahlgußbehälters befindet sich auf Nullniveau. Das umschließende Betongebäude hat folgende Hauptabmessungen:

-	Höhe des Gebäudes	45.100 mm
-	-- über Erdreich	21.800 mm
-	Durchmesser	15.050 mm
-	bebaute Fläche (Lagerbereich)	320 m ²
-	Umbauter Raum	9.400 m ³

Der Lagerbehälter ist aus 18 übereinanderliegenden, axial durch Spannkabel verspannten und an den Fugen gasdicht verschweißten Scheiben aufgebaut. Die Glasblöcke sind in 30 durch ein Doppeldeckelsystem gasdicht verschlossenen Lagerbohrungen zu je 15 Stück übereinander eingelagert. Jede dieser Lagerbohrungen ist zur Abdichtung der Fugen mit einem Edelstahlrohr ausgekleidet, welches zur Verbesserung des Wärmeübergangs durch hydraulisches Aufweiten an den Behälter angelegt ist.

Der Stahlgußbehälter ist von einem zur Hälfte unterirdisch angeordneten, zylindrischen Betongebäude umgeben, dessen Wände so bemessen sind, daß der Behälter gegen Einwirkungen von außen, z.B. Erdbeben, Flugzeugabsturz oder Gaswolkenexplosion, geschützt ist.

Um die durch den radioaktiven Zerfall der eingeschlossenen Spaltprodukte freigesetzte Wärme sicher abzuführen, verfügt das konzipierte Übergangslager über drei voneinander unabhängige, redundante Kühlsysteme. Es sind dies ein dreifach redundantes Betriebskühlsystem, ein Notkühlsystem auf der Basis von freier Konvektion mit Umgebungsluft und ein weiteres Not-

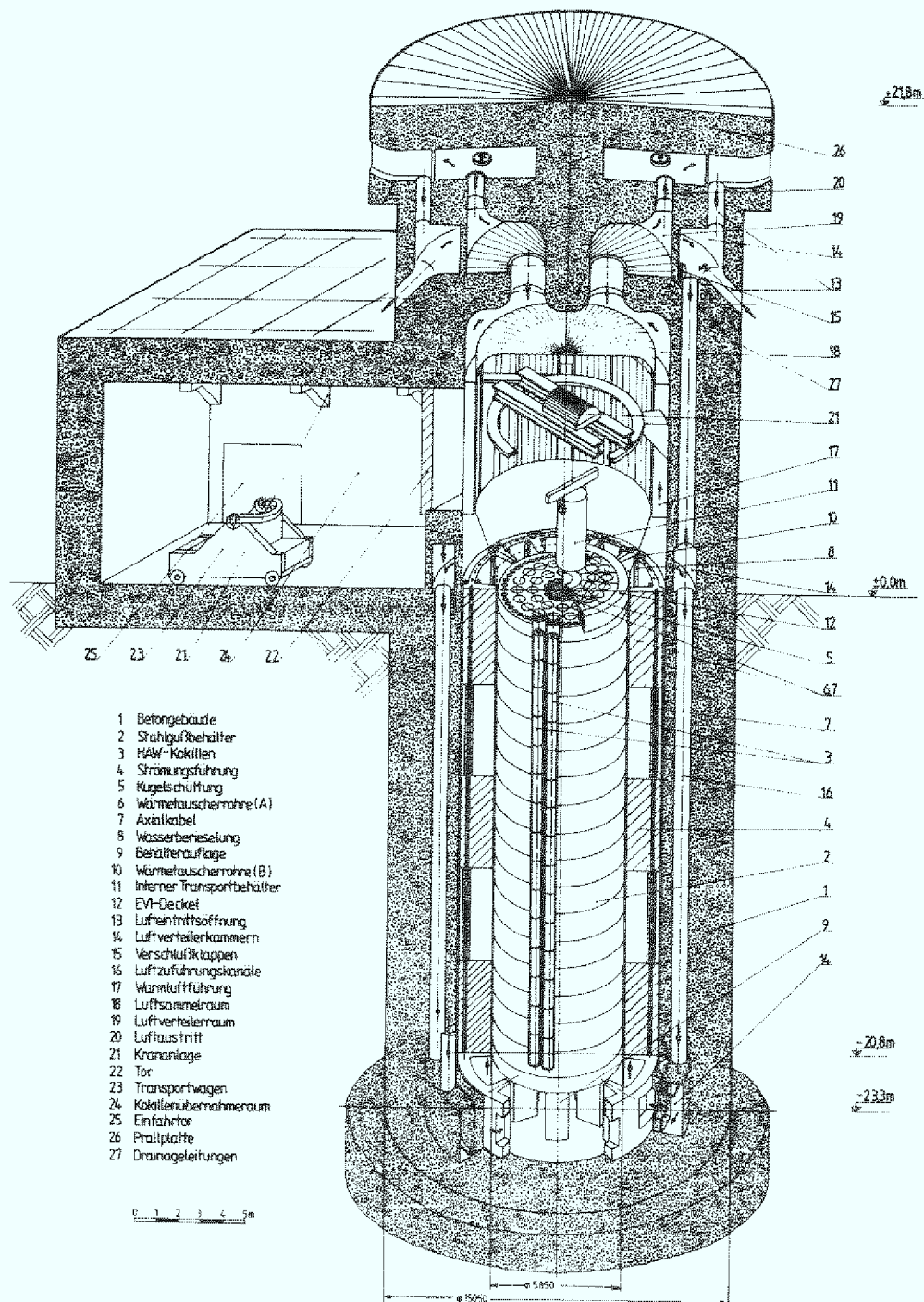


Bild 4-1: Dimetrische Darstellung für das konzipierte Übergangslager für HAW-Kokillen

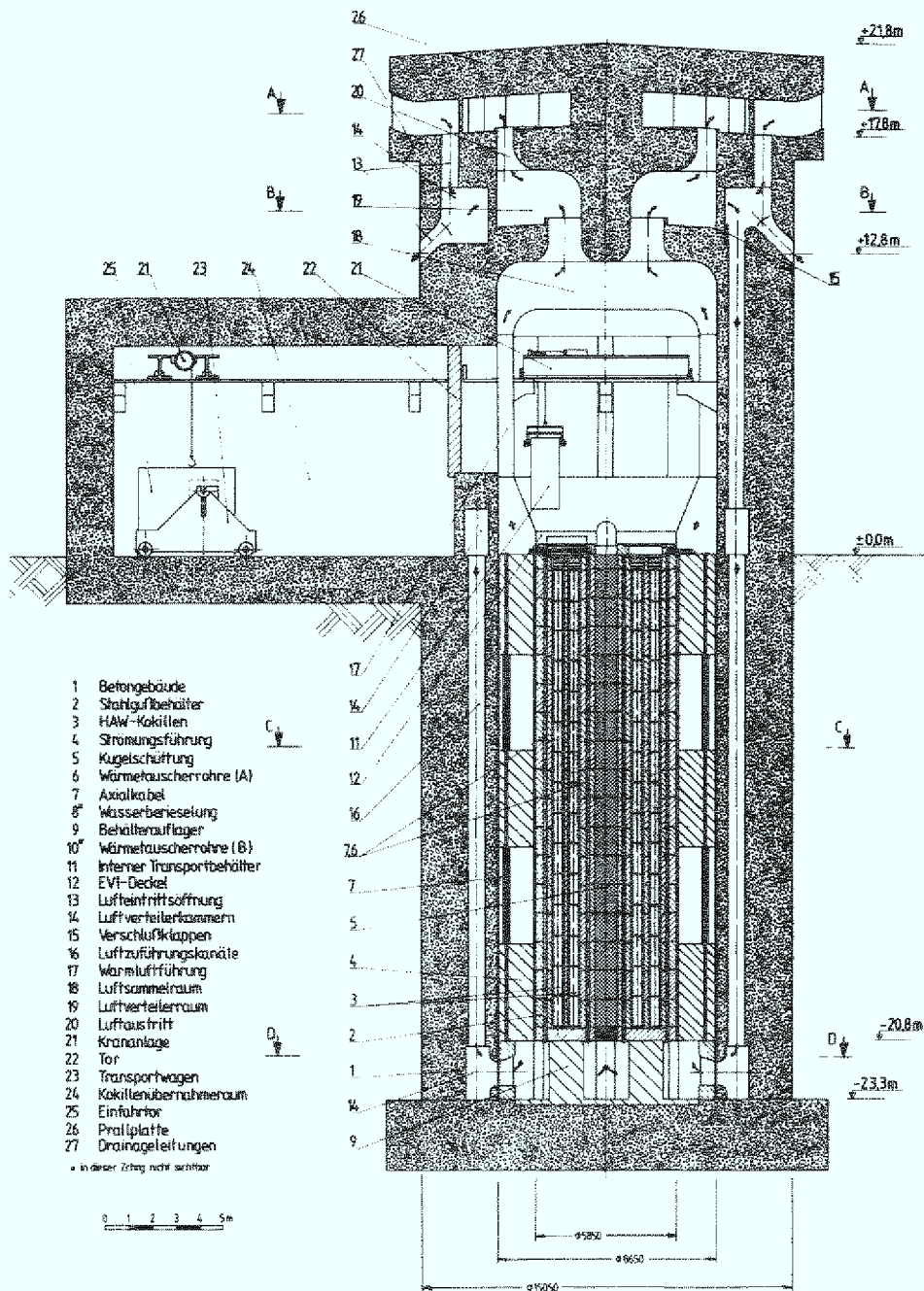


Bild 4-2a: Vertikalschnitt durch das konzipierte Übergangslager

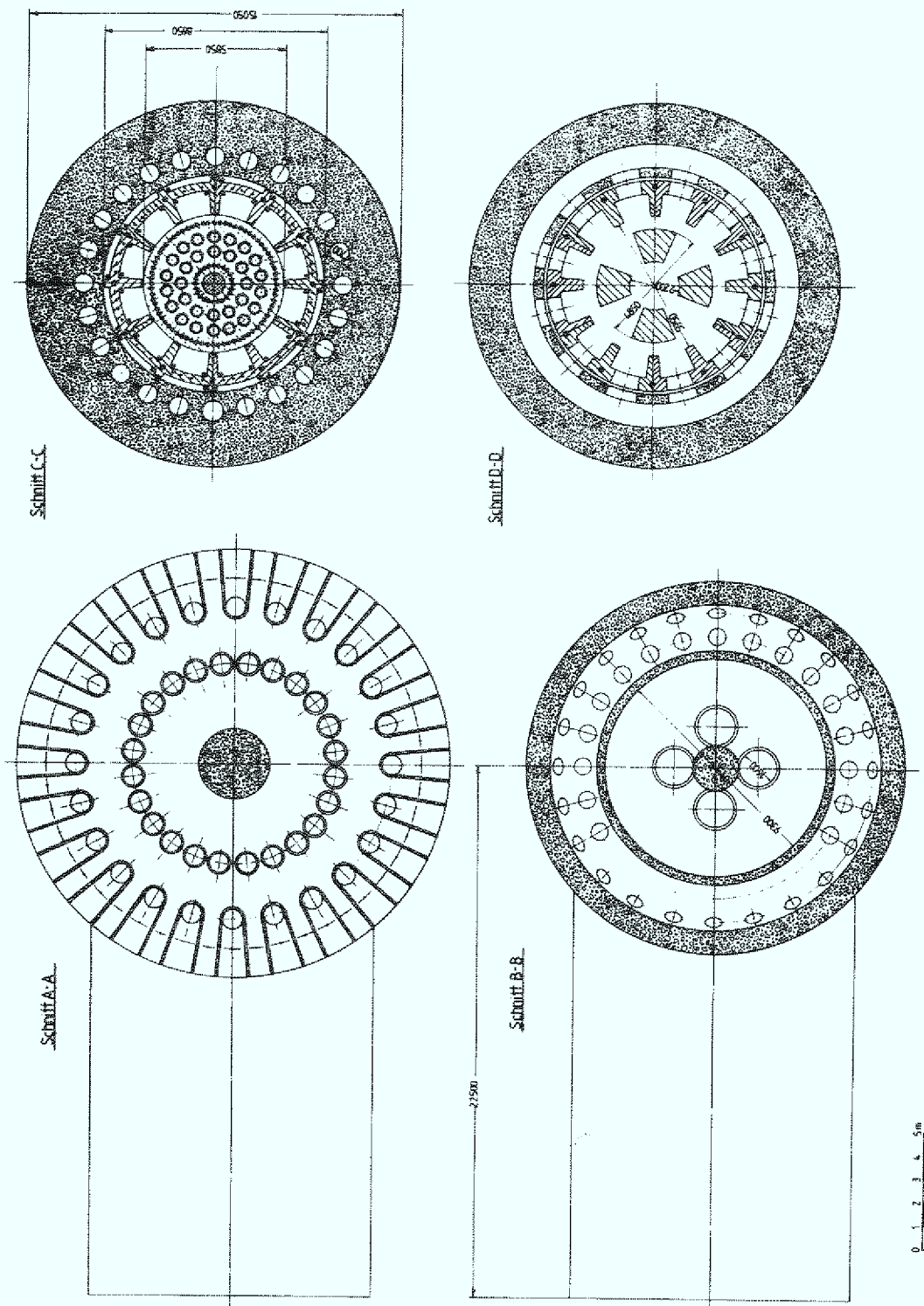


Bild 4-2b: Horizontalschnitt durch das konzipierte Übergangslager

kühlsystem zur Besprühung der heißen Behälteroberfläche mit Wasser. Jedes dieser Kühlsysteme ist in der Lage, mindestens 100% der Auslegungswärmeleistung abzuführen und die Strukturen des Lagers auf ein unkritisches Temperaturniveau zu kühlen.

Das mit vollentsalztem Wasser betriebene Betriebskühlsystem besteht aus 48 am äußeren und inneren Umfang im Stahlgußbehälter eingebauten Doppelrohrelementen, durch die ca. 70% der erzeugten Wärme abgeführt werden, sowie aus einer Gebäudewandkühlung mit ca. 27,5% Kühlleistung. Es ist dreifach redundant ausgelegt und dient zur Nutzwärmeauskopplung. Eine in einem Nebengebäude untergebrachte Flüssig-Flüssig-Wärmetauscheranlage übergibt die Nutzwärme an einen Verbraucher, z.B. Fernwärmeversorger, Unterglaskulturen, agroindustrielle Nutzer oder Teichwirtschaftsbetriebe. Bei einem Ausfall des Verbrauchernetzes dienen Luftkühler zur Wärmeabgabe an die Umgebung. Hierdurch wird ein sofortiges Umschalten auf Notkühleinrichtungen vermieden.

Beim Versagen der betrieblichen Kühlung wird das erste Notkühlsystem in Betrieb genommen. Es arbeitet nach dem Prinzip der freien Konvektion mit aus der Umgebung angesaugter Luft. In den Luftzuführungskanälen befinden sich Klappen. Werden diese geöffnet, so tritt Umgebungsluft durch Öffnungen -sie befinden sich 12 m über Erdniveau- in den Lagerbereich ein. Es baut sich dann im Lagergebäude ein Konvektionskühlkreislauf auf, dessen treibende Kraft die heiße Oberfläche des Stahlgußbehälters darstellt -Naturkonvektion-. Die durch die Öffnungen in der Gebäudeaußenwand angesaugte, kalte Umgebungsluft strömt durch Kanäle in der Betonwand des Schutzgebäudes zum Fundamentraum, kühlt die Auflager des Stahlgußbehälters und steigt unter ständiger Erwärmung am Behälter empor. Vom oberen Ende des Behälters wird die Luft in einem Ringkanal durch die Decke des Schutzgebäudes in die Umgebung zurückgeleitet. Für die ausreichende Kühlung des Lagers sind nur 25% der zur Verfügung stehenden Strömungsquerschnitte erforderlich.

Der Lagerbehälter ist zur Vermeidung einer zu großen Temperaturbelastung des Fundamentes und zur Sicherstellung einer ausreichenden Kühlung des Fundamentraumes sowie der Behälterbodenplatte im Notkühlbetrieb auf einer Stützenkonstruktion aufgelagert. Hierdurch kann sich die einströmende Kühlluft unabhängig vom Einströmort verteilen, inaktive Zuströmkanäle bergen somit nicht die Gefahr einer partiellen Überhitzung in sich.

Erfüllt das erste Notkühlsystem seine Funktion nicht, so ist der Einsatz des zweiten Notkühlsystems vorgesehen. Zur Abfuhr der erzeugten Wärme wird die Behälteroberfläche mit Wasser besprüht. Die Speisung dieses Sprühsystems erfolgt von Hydranten, Tankfahrzeugen oder aus Feuerlöschteichen durch Anschlüsse an der Außenwand des Schutzgebäudes. Das installierte Kühlsystem ist in der Lage, mindestens $2 \cdot 100\%$ der Auslegungswärmeleistung abzuführen und die Strukturen des Lagers auf unkritische Temperaturen zu kühlen.

Zur Verbesserung der Notkühlmaßnahme -Besprühen der Behälteroberfläche mit Wasser- ist vorgesehen, daß der Zentralschacht ($D(S) = 950 \text{ mm}$) eine metallische Kugelschüttung ($D(K) = 60 \text{ mm}$) enthält. Dadurch erhöhen sich die wärmespeichernde Masse ($G(K) = 69 \text{ t}$) und die wärmeabführende Fläche ($A(K) = 890 \text{ m}^2$) wesentlich.

Die Wärmeleistung des Übergangslagers hängt einerseits sehr stark vom Zeitpunkt der Wiederaufarbeitung ab und andererseits davon, wie lange die verglasten Abfälle bereits im Lager eingesetzt sind. Auf der Basis der heute in der Bundesrepublik Deutschland vor der Wiederaufarbeitung und Verglasung geplanten Abklingzeit der Brennelemente von sieben Jahren sowie der vorgesehenen Abfallbeladung der Glasblöcke, ist die durch den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte freigesetzte Wärmeleistung eines Übergangslagers auf 1000 kW festgelegt. Ausgehend von diesen Anfangsbedingungen geht die Wärmeproduktion innerhalb von zwanzig Jahren auf 400 kW zurück. Bis dahin beträgt die kumulierte nutzbare Wärme ca. 10^8 kWh, was gleichbedeutend ist mit 10^7 Litern leichtem Heizöl. Nach weiteren zwanzig Betriebsjahren ist die Leistung soweit abgesunken, daß das Lager auch ohne aktive Kühlung den sicheren Einschluß der Abfälle gewährleistet.

Zur Erhöhung und zur zeitlichen Vergleichmäßigung der abgegebenen Wärmemenge bietet sich die Errichtung mehrerer derartiger Übergangslager am gleichen Standort an (Bild 4-3). Da das Fassungsvermögen eines Stahlgußlagerbehälters so bemessen ist, daß er die anfallenden, verglasten Spaltprodukte entsprechend dem einjährigen Betrieb einer Kernkraftwerksleistung von 25 GW(e) aufnehmen kann, müßte jedes Jahr ein Lager neu errichtet werden /4-1, 4-2/.

Die Hauptauslegungsdaten des beschriebenen Übergangslagers sind in der Tabelle 4-1 zusammengefaßt.

4.1 ANFORDERUNGEN BEI DER KONZIPIERUNG DES ÜBERGANGSLAGERS

Zum Schutz der Umwelt vor Radioaktivität bestehen bei Einrichtungen zur Lagerung hochradioaktiver Stoffe strenge Sicherheitsrichtlinien. So dürfen selbst die Auswirkungen extremer Störfälle keine sicherheitstechnische Relevanz haben, d.h. die Strahlenabschirmung muß erhalten bleiben, die Abfuhr der Nachzerfallswärme gesichert sein, und es darf keine Radioaktivität an die Umgebung freigesetzt werden.

Das Übergangslager soll eine zeitlich begrenzte sichere Verwahrung der bei der Wiederaufarbeitung anfallenden, in Glas fixierten Spaltprodukte gewährleisten. Ferner sollte es eine betriebliche Entkopplung der Wiederaufarbeitungsanlage vom Endlager ermöglichen. Die Abnahme der spezifischen Wärmeleistung des Lagergutes während des Lagerzeitraumes würde eine dichtere Packung der Kokillen gegenüber einem Endlager heutiger Konzeption ermöglichen.

Durch diese Anforderungen sowie den Wunsch der Wärmenutzung mußten bei der Konstruktion des Übergangslagers folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Die anfallende Nachzerfallswärme der Spaltprodukte muß sicher abgeführt werden, dabei ist gegebenenfalls die Möglichkeit einer Wärmenutzung zu berücksichtigen.
- Der nachweislich sichere Einschluß der radioaktiven Stoffe über lange Zeiträume in der technischen Anlage muß gewährleistet sein.

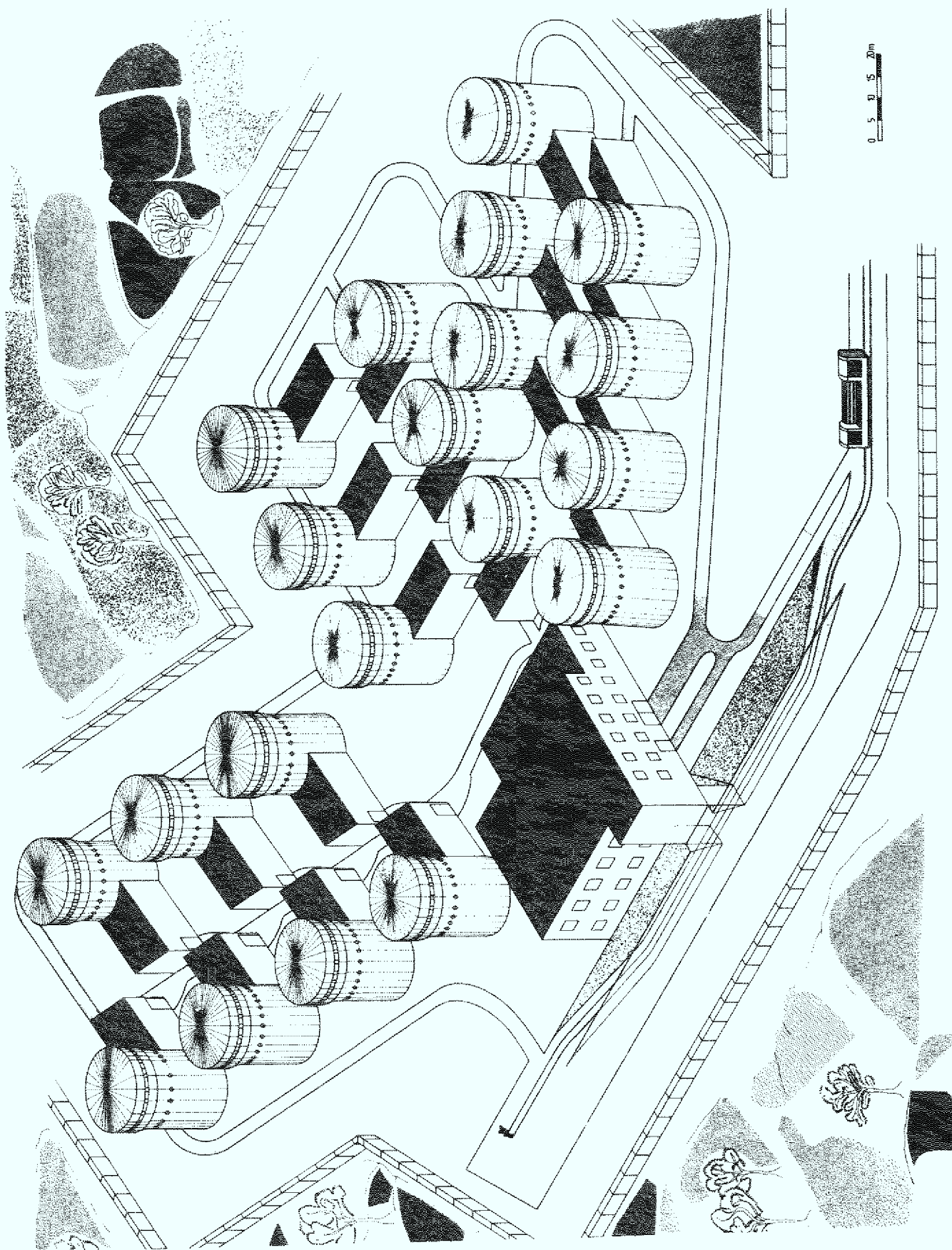


Bild 4-3: Lageplan für eine Sicherstellungsanlage

Daten des Lagergutes		Daten der Anlage	
Abmessungen der Glasblöcke * Typ COGEMA * Höhe 1335 mm * Durchmesser 430 mm * Wandstärke 5 mm * Inhalt 0,15 m ³		Gebäude Hauptabmessungen * Durchmesser 15 m * Breite 30,8 m * Höhe des Gebäudes 45 m über Erdreich 22 m	
Material des Glasblockmantels Edelstahl Material des Glases Borosilikatglas Gewicht des Mantels 115 kg Gewicht des Borosilikatglases 405 kg Dichte des Borosilikatglases 2700 kg/m ³ Metalloide im Glas 58 kg/Glasblock * Gew.-% 12,5 Einlagerungszeitpunkt nach Reaktorentnahme 7 Jahre Aktivitätsinventar zum Zeitpunkt der Einlagerung 5 * 10 ¹⁶ Bq/Glasblock Dosisleistung eines Glasblockes an der Oberfläche 2 * 10 ⁵ rad/h		Abmessung des Lagerbereichs * Länge 20,8 m * Breite 5,85 m * Durchmesser 320 m ² * Überbaute Fläche 9400 m ³ * Umbauter Raum	
Wärmeproduktion eines Glasblockes * zum Einlagerungszeitpunkt 2000 W (7 a nach Reaktorentnahme) * 10 a nach Reaktorentnahme Leistungsdichte 14000 W/m ³ Wärmestromdichte 1100 W/m ² Glasteperaturen * max. zulässige 450 °C * max. Zentraltemperatur 380 °C (Betrieb) Wandtemperatur des Glasblockes 260 °C Verweilzeit in der Anlage 100 Jahre		Lagerkapazität * Anzahl der Lagergestelle 1 * Anzahl der Lagerschächte 30 * Stapelung (übereinander) 15 fach * Fassungsvermögen 450 Glasblöcke * Lagerausnutzung * gleichwertige Brennelementmenge 573 t U _{aqv}	
		max. Wärmeleistung 1 MW Betriebskühlung/1. Notkühlung Zwangs-/Naturkonvektion * Wärmeträger Wasser / Luft * Betriebsdruck 20 bar / drucklos * Massenstrom 62,4 kg/s / -- * Luftdurchsatz -- / 32 kg/s Temperaturen * Wasser-/Luft Eintritt 147 °C / 35 °C * Wasser-/Luft Austritt 150 °C / 80 °C * Schachtwand 200 °C / 280 °C	

Tab.4-1: Auslegungsdaten des konzipierten Übergangslagers

4. Anlagenbeschreibung des Übergangslagers

- Einwirkungen von außen (EVA) und Einwirkungen von innen (EVI) dürfen den sicheren Einschluß der hochradioaktiven Stoffe nicht in Frage stellen.
- Die auftretende Strahlendosis muß weit unterhalb der zulässigen Grenzen bleiben.
- Ein Nach- bzw. Umrüsten der Anlage nach neuen Richtlinien sollte möglich sein.
- Die Größe der Anlage ist so zu wählen, daß die nötigen Investitionen dem tatsächlichen Bedarf angepaßt und die Zinsbelastung minimiert werden kann. Daher sollte die Lagerkapazität dem jährlich anfallenden, verglasten HAW entsprechen.
- Nach der Wärmenutzungsphase sollte es möglich sein, die Anlage durch inhärent sichere Kühlmaßnahmen in weiten Bereichen sich selbst zu überlassen.
- Das bauliche Erscheinungsbild der Anlage sollte die Akzeptanz erhöhen.

4.2 WÄRMEERZEUGENDE ELEMENTE

Als wärmeerzeugende Elemente werden die von der COGEMA in die BRD zurückgelieferten Glasblöcke zugrunde gelegt. Abweichende Geometrien werfen jedoch keine Probleme auf. In Bild 4-4 ist ein derartiger Glasblock abgebildet und mit den Hauptabmessungen versehen. Er hat die Form einer Flasche, deren Oberteil so ausgebildet ist, daß ein Manipulator das Element fernbedient greifen kann. Die Umhüllung besteht aus einem 5 mm dicken Edelstahlzylinder (Werkstoff Z 15 CN 24 12, ähnlich 1.4571). Die Spezifikationen der COGEMA /4-3/ sehen eine Verglasung 4 Jahre nach Entnahme der BE aus dem Reaktor vor. Als Referenzbrennelement ist ein DWR-Element mit 3,5% Anfangsanreicherung und 33 GWd/t(SM) Abbrand definiert. Die Wärmeleistung würde unter diesen Randbedingungen 3600 W/Block betragen. Es ist jedoch vorgesehen, die Glasblöcke bis zum Abfall der Wärmeleistung auf 2000 W/Block bei der COGEMA zwischenzulagern, das ist gleichbedeutend mit einer Auslieferung an die deutschen Energieversorgungsunternehmen 7 a nach Reaktorentnahme. Die dann durchzuführende Sicherstellungslagerung bzw. Endlagerung ist Aufgabe des Bundes.

Für die Auslegung des Übergangslagers wird eine Kokillenleistung von 2250_W zugrunde gelegt; dies entspricht nach /4-3/ einem Auslieferungszeitpunkt von 6 a nach Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor.

Als zulässige Maximaltemperaturen, bei der die Glasspezifikationen garantiert werden, gibt die COGEMA 450 Grad C an. Bedingt durch die gewählte Glaszusammensetzung liegt die Transformationstemperatur zwischen 510 und 560 Grad C /4-3/. In Tab. 4-2 sind die wesentlichen Daten der COGEMA-Blöcke zusammengestellt, Tabelle 4-3 enthält die wichtigsten im Glasblock enthaltenen Nuklide, gewährleisteten Oberflächenquellen, Aktivitätsinventare usw.

Zur Zeit laufen Untersuchungen zur Verbesserung der Glasqualität der in einer möglichen deutschen Wiederaufarbeitungsanlage produzierten Glasblöcke. Diese Forschungsvorhaben werden mit dem Ziel durchgeführt, die Transformationstemperatur und die Auslaugeraten zu erhöhen. Nach /4-4/ und /4-5/ treten erst deutlich oberhalb 600 Grad C nach zweijährigem Tempern von Glasproben Veränderungen im Röntgenbeugungsdiagramm auf, die das Erreichen des Transformationsintervalls anzeigen.

Daten der Kokille		
* Höhe	1335	mm
* Durchmesser	430	mm
* Wandstärke	5	mm
* Stapelhöhe	ca. 1255	mm
* Gesamtvolumen	ca. 180	dm ³
* Glasvolumen	ca. 150	dm ³
* Leergewicht	ca. 75	kg
* Gewicht beladen	ca. 480	kg
* Material	Z 15 CN 24 12 (ähnlich 1.4571)	
Referenzbrennelement		
* Anfangsanreicherung	3,5	Gew.-%
* mittlerer Abbrand	33	GWd/t(SM)
* Reaktortyp	DWR	
Daten des Glasproduktes		
* Glassorte	Borosilikatglas	
* Dichte	2700	kg/m ³
* Ausdehnungskoeffizient		
22 - 300 Grad C	8 * 10 ⁻⁶	
> 300 Grad C	9 * 10 ⁻⁶	
* Wärmeleitfähigkeit		
300 Grad C	1,3	W/mK
600 Grad C	1,7	W/mK
* Elastizitätsmodul	7,24-9,96 * 10 ⁹	N/mm ²
* max. Glasterperatur	450	Grad C
* Transformationsintervall	510 - 560	Grad C
* Spaltproduktbeladung	9 - 12,5	Gew.-%
* Uranäquivalent	1,33	t U/Kokille
Daten bei Anlieferung		
* Wärmefreisetzung	2000	W
* Gammaquelle	10 ⁵	rad/h
* Neutronenquelle	0,4	rad/h
} Oberfläche		

Tab.4-2: Zusammenstellung der Daten einer COGEMA-Kokille /4-3/

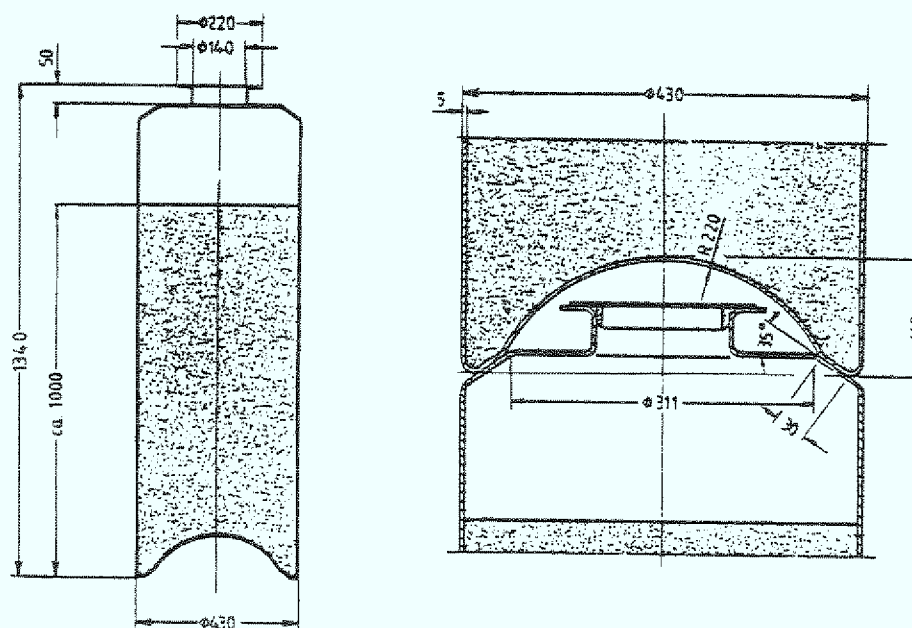


Bild 4-4: Glasblock mit Edelstahlmantel der Firma COGEMA zur Lagerung verglaster Spaltprodukte /4-3/

	Oberflächenkontamination zum Herstellungs-zeitpunkt		Aktivität pro Kokille
β und γ Strahler	$< 10^{-10}$ Ci/cm ²	$< 10^{-10}$ Ci/cm ²	79000 Ci
α Strahler	$< 10^{-11}$ Ci/cm ²	$< 10^{-11}$ Ci/cm ²	3800 Ci

Umrechnung: 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Thermodynamische Daten:

- Wärmeleitfähigkeit (W/mK):

$$\lambda = 0,8132 \cdot \text{Exp} (0,84873 \cdot 10^{-3} \cdot T(K))$$

- Dichte :

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

T (°C)	100	200	300	400	500	600
λ (W/mK)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,56	1,7
$\rho \cdot c_p$ (J/cm ³ °C)	2,6	2,83	3,165	3,39	3,62	3,84

Tab.4-3: Eigenschaften und Zusammensetzung des Glases /4-3/

Chemische Zusammensetzung:

	Glasfritte (Gew.-%)	Glasblock (Gew.-%)
SiO ₂	58,8	45,2
B ₂ O ₃	18,2	13,9
Al ₂ O ₃	4,1	4,9
Na ₂ O	7,9	9,8
ZnO	3,2	2,5
CaO	5,2	4,0
Li ₂ O	2,6	2,0
Fe ₂ O ₃		2,9
NiO		0,4
Cr ₂ O ₃		0,5
P ₂ O ₅		0,3
ZrO ₂ (Späne)		1,0
Spaltproduktoxide		11,1
Actiniden-Oxide		0,9
Metallpartikel		0,7

Zur Verglasung einer Tonne Uran sind 234 kg Glasfritte mit einem Volumen von 112 l/tU erforderlich, d.h. 312 kg Glasfritte pro Kokille

Actiniden pro Kokille:

Element	Gewicht	Aktivität
Pu	< 120 g	< 48 Ci
U	< 3000 g	
Np	< 850 g	
Cm	< 53 g	< 3300 Ci

	Dosisrate zum Herstellungszeitpunkt	Dosisrate bei Anlieferung
β und γ Strahler		
- an der Oberfläche	0,18 * 10 ⁶ rad/h	< 0,1 * 10 ⁶ rad/h
- in 1 m Abstand	0,2 * 10 ⁵ rad/h	
- in 3 m Abstand	0,65 * 10 ⁴ rad/h	
Neutronenstrahlung		
- an der Oberfläche	420 * 10 ⁻³ rad/h	< 0,4 rad/h
- in 1 m Abstand	16 * 10 ⁻³ rad/h	
- in 3 m Abstand	2 * 10 ⁻³ rad/h	

Tab.4-3a: Eigenschaften und Zusammensetzung des Glases

4.3 AUFBAU DES LAGERBEHÄLTERS

Aufgrund der vorgegebenen Ziele und Randbedingungen wurde der Lagerbehälter in zylindrischer Form ausgeführt (Bild 4-5). Er besteht aus 18 Stahlgußscheiben, die so miteinander verbunden sind, daß ein Verschieben der Scheiben auch in extremen Störfällen (Erdbeben, Flugzeugabsturz) nicht möglich ist. In dem Lagerbehälter sind 30 Lagerschächte zur Aufnahme der Glasblöcke vorgesehen.

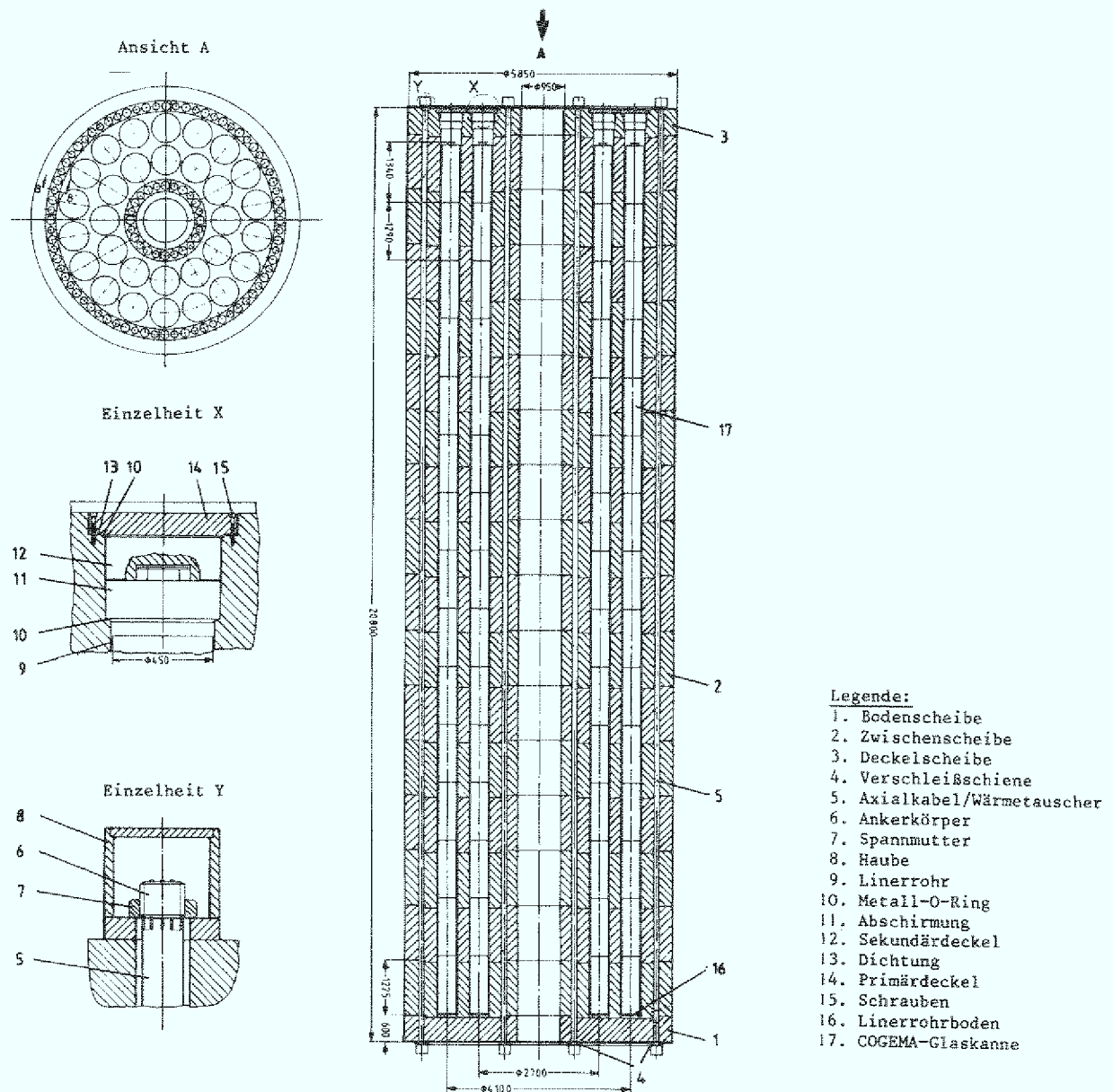


Bild 4-5: Gesamtansicht des aus Scheiben aufgebauten Lagerbehälters

4.3.1 BESCHREIBUNG DES BEHÄLTERS

Der Lagerbehälter erreicht eine Gesamthöhe von 20.800 mm und hat einen äußeren Durchmesser von 5.850 mm. Diese Hauptabmessungen ergeben sich aus folgenden Randbedingungen:

- 450 Glasblöcke in einem Lagerbehälter,
- Strahlenabschirmung und
- fertigungstechnische Gesichtspunkte.

Die innere Bohrung von 950 mm ist aus Gründen der Kühlung -Besprühen der Behälteroberfläche mit Wasser- der Innenzonen und der Gewichtsersparnis notwendig.

Für die Aufnahme der 450 Glasblöcke stehen 30 Lagerschächte zur Verfügung, die auf zwei Teilkreisen (18 Lagerschächte auf einem Durchmesser von 4.100 mm und 12 Lagerschächte auf einem Durchmesser von 2.700 mm) angeordnet sind. Dies bedeutet, daß je Lagerschacht 15 COGEMA-Kannen eingelagert werden müssen, wodurch die Behälterhöhe weitgehend festgelegt ist. Diese Behälterhöhe wird durch einen scheibenförmigen Aufbau des Lagerbehälters verwirklicht. Hierzu werden 18 Scheiben übereinander gestapelt:

- eine Bodenscheibe (Bild 4-6),
- sechzehn Zwischenscheiben (Bild 4-7) und
- eine Deckelscheibe (Bild 4-8).

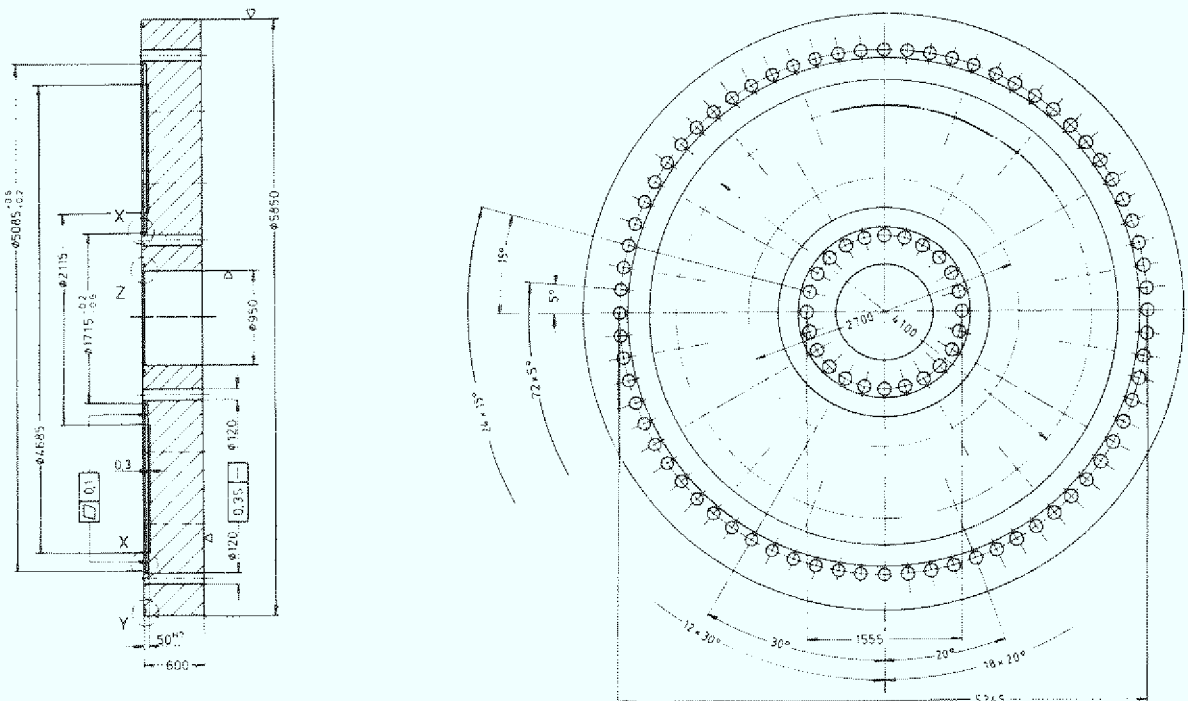


Bild 4-6: Bodenscheibe des Lagerbehälters /4-1/

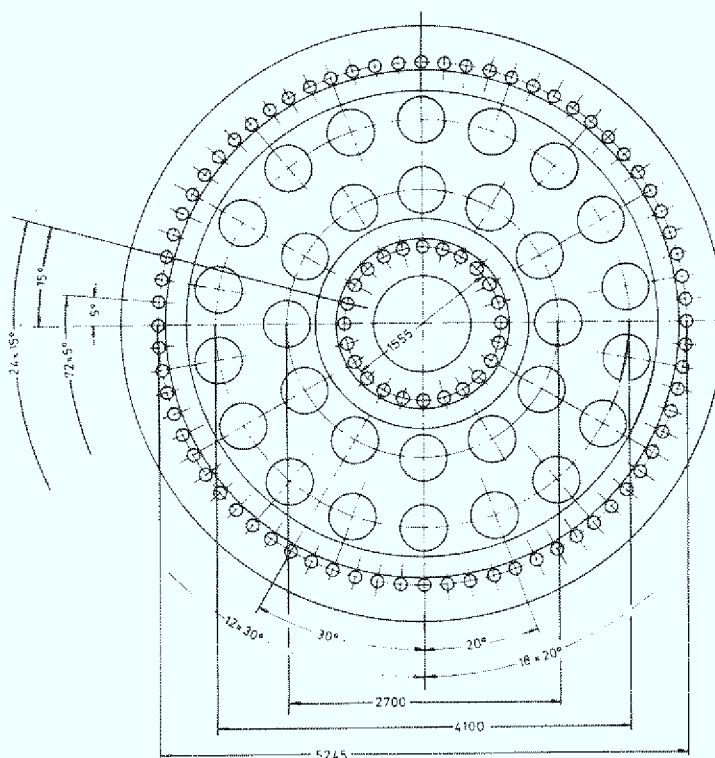
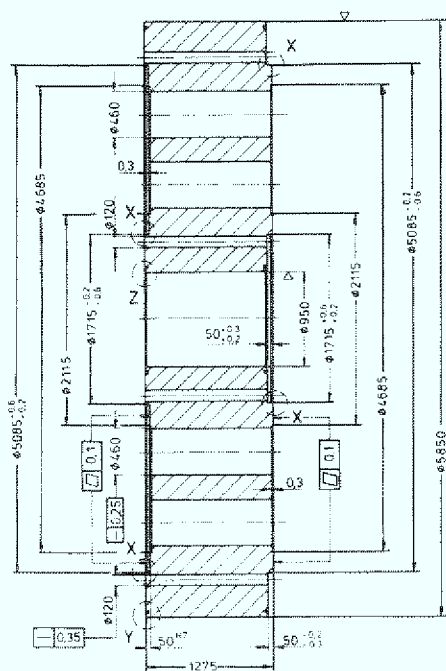


Bild 4-7: Zwischenscheibe des Lagerbehälters /4-1/

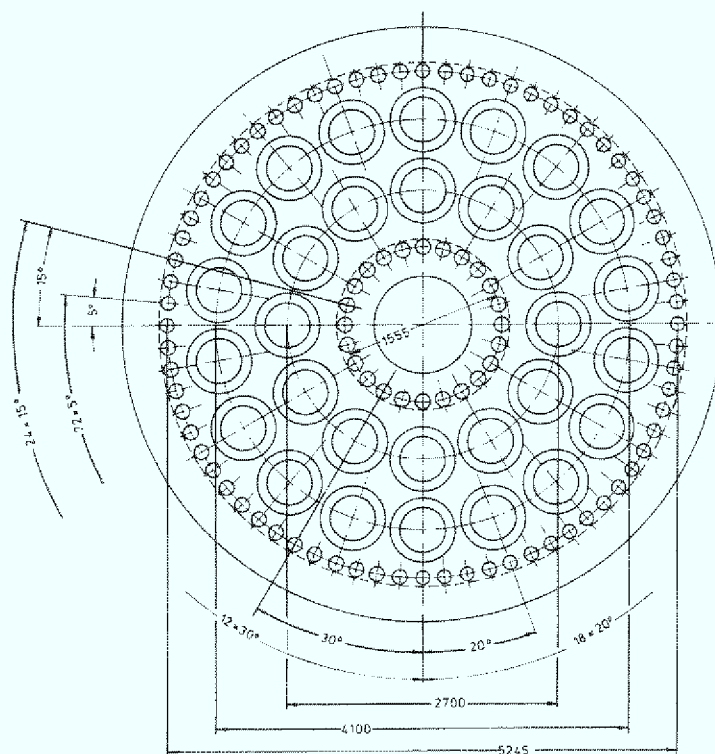
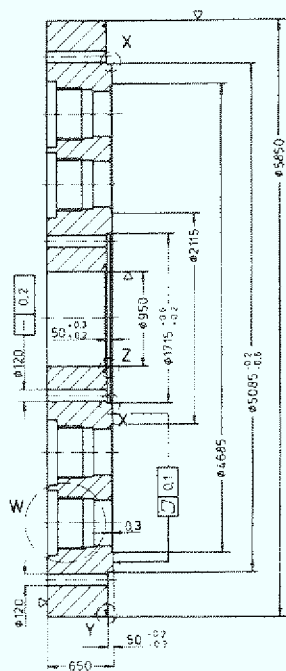


Bild 4-8: Deckelscheibe des Lagerbehälters /4-1/

Die Deckelscheibe ist konstruktiv so gestaltet, daß sie das Doppeldeckelsystem zum gasdichten Abschluß der Lagerschächte aufnehmen kann. Hierzu gehört auch ein Abschirmstopfen, der die Abschirmung während der Be- und Entladung des Übergangslagers gewährleistet. Die 16 Zwischenscheiben bilden den eigentlichen Lagerbereich des Behälters.

Der so aufgebaute Lagerbehälter wird mit Hilfe von 48 Spannkabeln in axialer Richtung vorgespannt. Sie dienen hauptsächlich zur Aufnahme der bei eventuellen Erdbeben auftretenden Axialkräfte.

Zur Strahlenabschirmung muß der freie Strahlungsweg zwischen den einzelnen Behälterscheiben durch konzentrische Absätze unterbrochen werden. Um eine Strahlendosis von 0,75 mrem/h an den Manteloberflächen des Lagerbehälters einzuhalten, ist bei dem gewählten Lagerbehältermaterial (GS-C 25) eine Abschirmdicke von 265 mm notwendig, die den Innen- und Außendurchmesser mit bestimmt.

Gleichzeitig dient diese Strahlenfalle auch zur Zentrierung der Scheiben bei der Montage. Die 50 mm tiefen Absätze liegen auf einem Durchmesser von 5.085 mm bzw. 1.715 mm.

Aus Gründen der Gasdichtheit werden die 30 Lagerschächte mit Linerrohren ausgekleidet. Die Edelstahlrohre (Werkstoffnummer 1.4541) liegen klangfest am Lagerbehälter an. Hierdurch wird auch das Wärmeübergangsverhalten zwischen Glasblock und Lagerbehälter verbessert. Der gasdichte Abschluß der Lagerschächte erfolgt durch einen am Liner angeschweißten Klöpperboden und das bereits erwähnte Doppeldeckelsystem. Als weitere Barriere gegen Gasaustritt gilt das Dichtschweißen der Fugen zwischen den Scheiben. Ferner werden die 96 Bohrungen zur Aufnahme der Doppelrohrwärmetauscher und der Axialkabel durch Kappen so verschlossen, daß ihre Gasdichtheit gewährleistet ist.

Bei diesen Betrachtungen ist es wichtig, die zulässigen Materialbeanspruchungen zu berücksichtigen. Daher wird das Außenrohr der Doppelrohrwärmetauscher so in die Behälterbohrung eingepaßt, daß bei maximal zu gewinnender Wärme die Wärmespannungen in den Scheiben die zulässigen Materialwerte unterschreiten. Die Hauptauslegungsdaten des Stahlgußlagerbehälters sind in der Tabelle 4-4 zusammengefaßt.

Als Werkstoff wurde der warmfeste Stahlguß GS-C 25 (Werkstoffnummer 1.0619) gewählt. In der Tabelle 4-5 ist die chemische Zusammensetzung sowie die gewährleisteten mechanischen Eigenschaften aufgeführt.

Der Werkstoff ist besonders geeignet für einen Einsatz im Temperaturbereich bis etwa 610 Grad C. Da bei einem eventuellen Störfall auch kurzfristig Temperaturen über der sonst üblichen max. Temperatur von 200 Grad C auftreten können, wurde dieser Werkstoff gewählt. Das Gußstück wird nach dem Gießen normalgeglüht. Risse sind nicht zulässig und müssen beseitigt werden. Ein großer Vorteil dieses Werkstoffes ist seine Schweißbarkeit mit üblichen Verfahren /4-5/.

Geometrische Daten		
- Innendurchmesser	0,95	m
- Außendurchmesser	5,85	m
- Höhe	20,8	m
max. Betriebstemperatur	200	Grad C
Auslegungsdruck im Lagerschacht	10	bar
Anzahl der Scheiben		
- Bodenscheibe	1	
Gewicht	118	t
- Zwischenscheiben	16	
Gewicht je Scheibe	201	t
- Deckelscheibe	1	
Gewicht	94	t
Gewicht des Lagerbehälters	3428	t
Material des Lagerbehälters (Werkstoff-Nr.)	GS-C 25 1.0619	
Abdichtung		
- Scheiben	Schweißlippen	
- Lagerschacht	Liner	
(Werkstoff-Nr.)	1.4541	
	Doppeldeckel	
Anzahl der Wärmetauscher-Doppelrohre	48	
Anzahl der Axialkabel	48	
Linerrohre	450 x 5	

Tab.4-4: Hauptauslegungsdaten des Stahlguß-Lagerbehälters

4.3.2 DER GASDICHTE EINSCHLUß DER GLASBLÖCKE IN DEN LAGERSCHÄCHTEN

Wie in der Kerntechnik üblich wird auch hier ein Mehrbarrierensystem gegen den Austritt der Spaltprodukte in die Biosphäre realisiert. Eine dieser Barrieren (siehe Kap. 7.3) ist beim Übergangslager der gasdichte Abschluß der Lagerschächte des Behälters. Für die langfristige Lagerung ist es notwendig, diese Barriere kontinuierlich zu überwachen. ...

Stahlgußsorte		Chemische Zusammensetzung ¹⁾ in Gew.-%						
Kurzname	Werkstoffnummer	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Sonstige
GS-C 25	1.0619	0,18 bis 0,23	0,30 bis 0,50	0,50 bis 0,80	≤ 0,30			
¹⁾ Der Phosphor- und Schwefelgehalt darf bei dem Stahl GS-C 25 höchstens je 0,050 % ₀ , bei den Stählen GS-22 Mo 4, GS-17 CrMo 5 5 und GS-17 CrMoV 5 11 höchstens je 0,040 % ₀ betragen; bei Stahl G-X 22 CrMo(W)V 12 1 sind Phosphorgehalte ≤ 0,045 und Schwefelgehalte ≤ 0,030 % ₀ zulässig.								

Stahlgußsorte		Zugfestigkeit kg/mm ²	0,2-Grenze bei einer Temperatur von							Bruchdehnung ($L_0 + 5 d_0$) % mindestens	Kerbschlag- zähigkeit ²⁾ kgm/cm ² mindestens
Kurzname	Werkstoffnummer		20 °C ¹⁾	200 °C	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C		
GS-C 25	1.0619	45 bis 60	25	19,5	17	15,5	14	13		22	5
¹⁾ Bei 20 °C gelten die Werte für die Streckgrenze, sofern sie sich ausprägt. ²⁾ Geprüft an der DVM-Probe. — Als Prüfergebnis ist das Mittel von drei Proben zu werten.											

Tab.4-5: Chemische Zusammensetzung und gewährleistete mechanische Eigenschaften des warmfesten Stahlgusses GS-C 25 nach DIN 17245 /4-6/

4.3.2.1 Der Lagerschachtliner

In jeden der dreißig Lagerschächte zur Aufnahme der HAW-Kannen wird zur Abdichtung der Fugen zwischen den gestapelten Scheiben nach deren Montage ein Linerrohr als gasdichter Abschluß eingebracht. Zur Einfädung dieses Rohres ist zum Ausgleich von Achsenabweichungen im Rohr sowie zum Ausgleich von geringfügigen Versätzen in den Behälterbohrungen ein Spiel von ca. 10 mm erforderlich. Da aber ein Gasspalt zwischen Liner und Behälterbohrung wärmeisolierend wirken würde, muß der Liner durch Aufweiten an die Lagerbehälterwandung angelegt werden.

Hierzu wird das mit einem den Aufweitdruck tragenden Boden versehene Edelstahlrohr (Werkstoffnummer 1.4541 entsprechend X10 CrNiTi 18 10) in die Behälterbohrung eingebracht. Eine mit einer Dichtung versehene Lanze sperrt das obere Rohrende gasdicht ab. Beim Einführen der Lanze liegt die Dichtung geschützt in einer Nut. Sie wird zu Beginn des Arbeitszyklus gespreizt und gegen die Rohrwandung gedrückt (Bild 4-9).

Der Aufweitvorgang beginnt mit der Druckbeaufschlagung des Rohrrinneren. Aufgrund der Lanzenkonstruktion steigt der Anpreßdruck der Dichtung proportional mit dem Druck im Linerrohr, so daß ein "Auswandern" der Dichtung unterbunden ist.

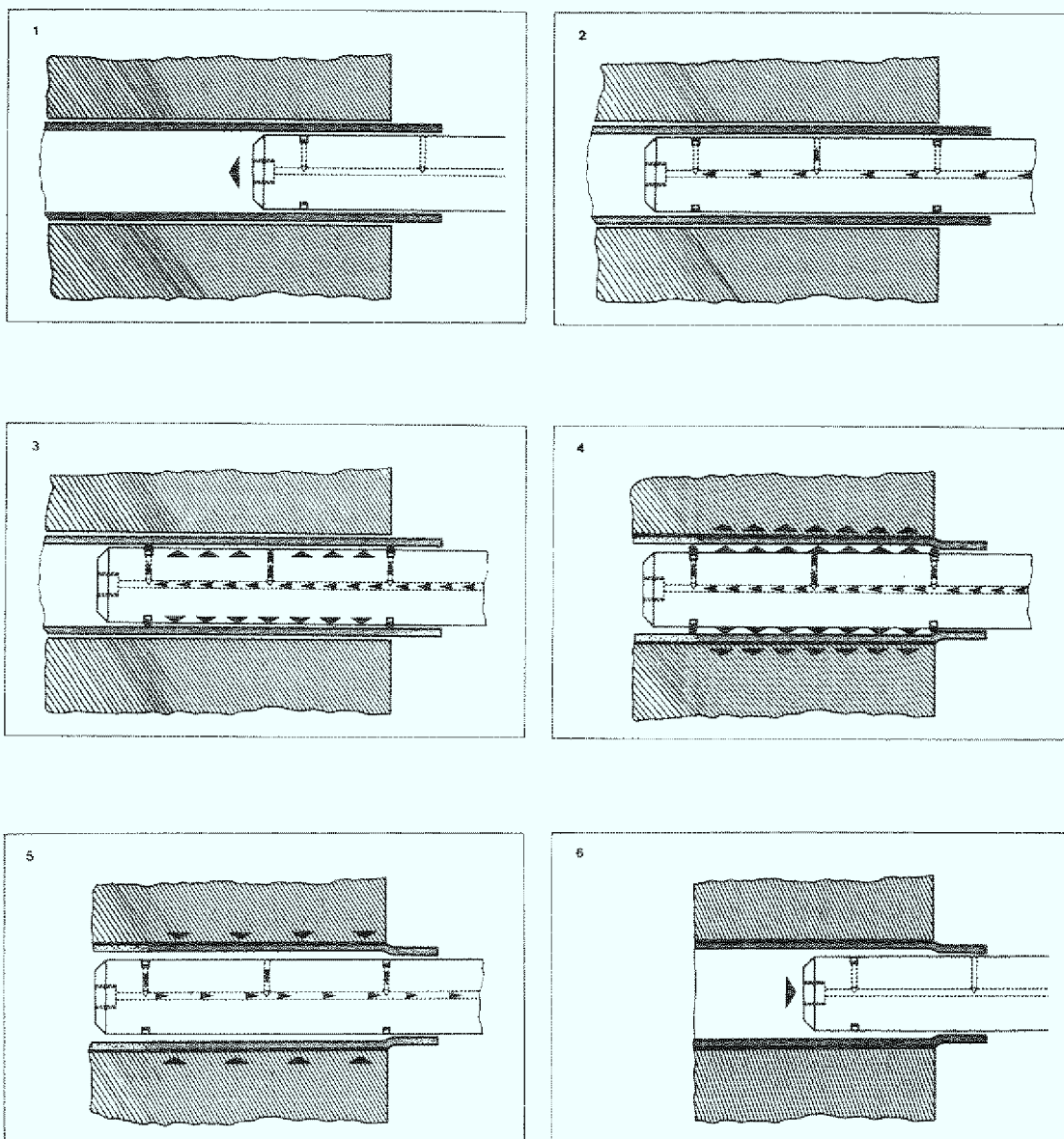


Bild 4-9: Verfahrensablauf beim hydraulischen Rohraufweiten /4-7/

Mit steigendem Innendruck wird die Elastizitätsgrenze des Rohrwerkstoffs überschritten, das Rohr weitet sich radial plastisch auf, bis es in der Bohrung des Lagerbehälters fest anliegt. Durch den hohen Innendruck werden auch auf die Bohrungswand Kräfte übertragen, die eine radiale Aufweitung der Bohrungen im elastischen Bereich bewirken. Nach der Druckentlastung erfolgt somit eine elastische Rückfederung des Behältermaterials um das plastisch verformte Linerrohr.

Durch elastische Rückfederung des Linerwerkstoffes, durch Unebenheiten der Bohrung und durch Wandstärkenunterschiede im Linerrohr kann trotz des hohen Anpreßdruckes nach der Druckentlastung nicht ausgeschlossen werden, daß sich Teilbereiche (< 10%) des Linerrohres wieder von der Behälterbohrung abheben und somit einen isolierenden Spalt bilden.

Dieser Effekt führt jedoch nicht zu wärmetechnischen Problemen, da die Betriebstemperatur des Liners bei ca. 200 Grad C liegt. Durch die unter-

schiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Behälterwerkstoffs ($\alpha=11 \cdot 10^{-6}/\text{Grad C}$) und des Edelstahlrohres ($\alpha=16 \cdot 10^{-6}/\text{Grad C}$) dehnt das Edelstahlrohr sich bei Erwärmung stärker aus als die Behälterbohrung, d.h. die o.g. Rückfederung wird rückgängig gemacht.

Das beschriebene Verfahren eignet sich auch zur Montage der äußeren Rohre der Doppelrohrwärmetauscher. Durch das Aufbringen einer Drahtgeflechtmatte auf die Rohraußenwand kann bei Bedarf ein definierter Spalt zwischen Wärmetauscherbohrung und Rohrwand erzeugt werden. Mit dieser Maßnahme läßt sich so ein definierter Wärmeübergangswiderstand zum Kühlmedium einstellen, wodurch der radiale Temperaturgradient in den Scheiben in für die Werkstoffbelastung zulässigen Grenzen gehalten werden kann.

Wegen der Differenzen in den Wärmeausdehnungskoeffizienten ist es erforderlich, die unterschiedliche Längendehnung zwischen Behälter und Liner zu kompensieren, denn es kann nicht ausgeschlossen werden, daß sich trotz der am Behälter anliegenden Rohrwandung axiale Relativbewegungen einstellen. Aus diesem Grunde wird in der Deckelscheibe die Montage eines Kompensators vorgesehen, der in der Lage ist, die gesamte Relativdehnung von 163 mm bei einer Temperaturexkursion bis 500 Grad C aufzunehmen.

Aufgrund des hier gewählten Verfahrens der hydraulischen Rohraufweitung kann man nicht gewährleisten, daß das Linerrohr bei Temperaturzyklen in der ihm zugedachten Position verharret. Vielmehr ist durch die im Vergleich zum Stahlgußbehälter größere Wärmeausdehnungszahl ein axiales Wandern des Linerrohres innerhalb der Bohrung denkbar. Zur Unterbindung dieses Vorganges werden in der Bodenscheibe des Lagerbehälters Haltevorrichtungen vorgesehen. Die Linerrohre werden vor dem Aufweiten in die Vorrichtungen eingeführt, um 90 Grad gedreht und somit gegen axiales Wandern vom Lagerbehälterboden aus gesichert (Bild 4-10).

4.3.2.2 Das Doppeldeckelsystem

Jeder Lagerschacht wird durch ein Deckelsystem (Bild 4-11) gasdicht gegenüber der Umgebung abgeschlossen. Das in der Deckelscheibe des Lagerbehälters angeordnete Deckelsystem besteht aus:

- einem Primärdeckel mit zwei Dichtungen,
- einem Sekundärdeckel (Gewindebolzen) und
- einer Abschirmung mit einer Dichtung.

Als erste Abschirmung des Lagerschachtes kommt ein Metall-O-Ring zum Einsatz. Metall-O-Ringe sind endlose Dichtungen. Die Vorteile dieser Dichtungen sind z.B. die beständigen Dichtungseigenschaften und einfache Nutgestaltung, die leichte Montage und die hohe thermische und mechanische Belastbarkeit. Bei der Montage dieser Dichtungen ist jedoch auf eine gleichmäßige Verteilung des Anpreßdruckes über dem Umfang der Dichtung zu achten.

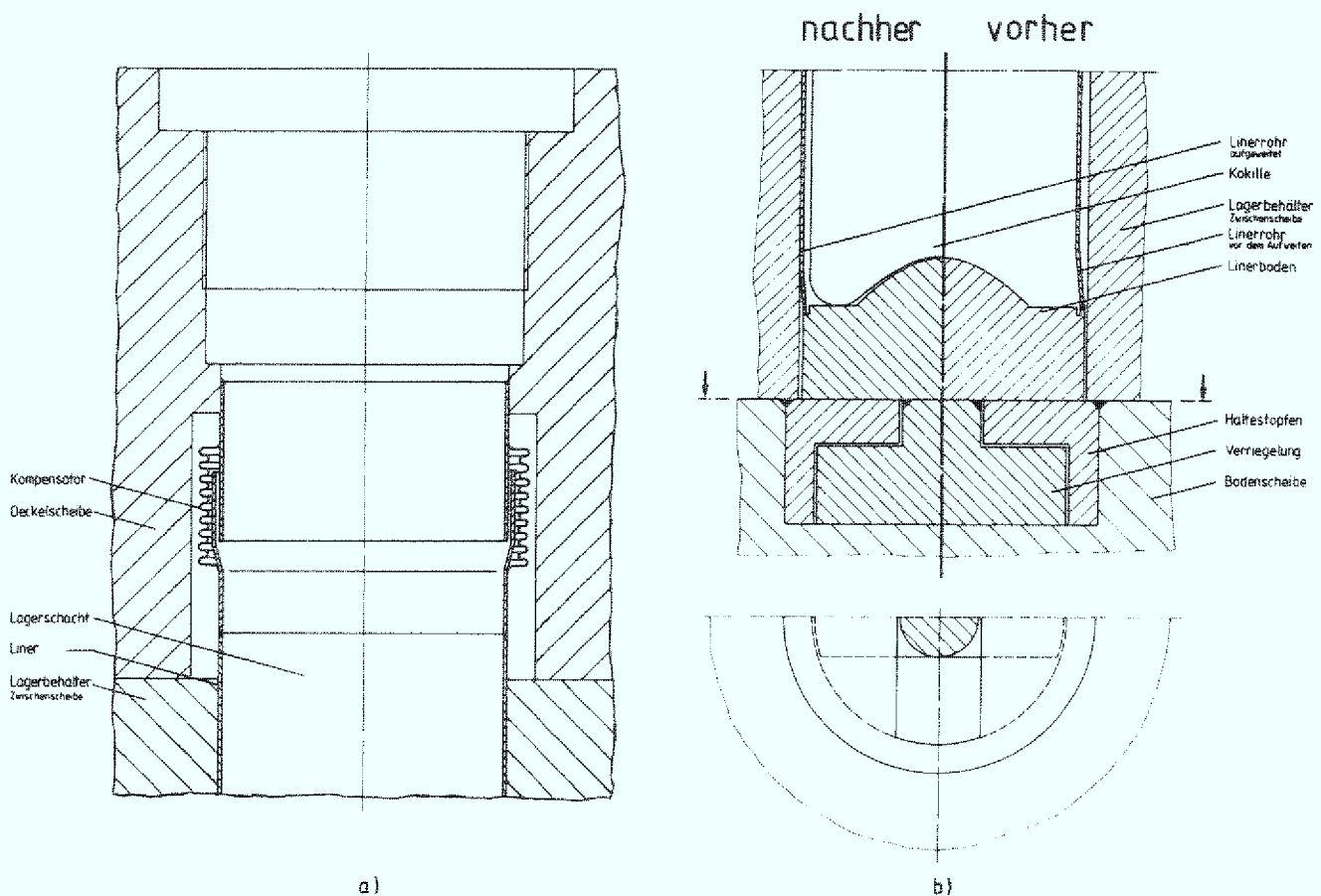
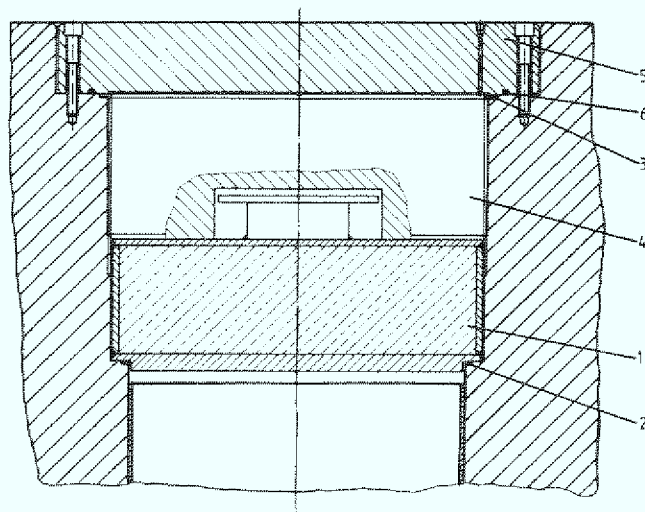


Bild 4-10: Anbindung des Lagerschachtliners an den Behälter
 a) Anbindung des Lagerschachtliners mittels Kompensator an die Deckelscheibe des Lagerbehälters
 b) Verankerung des Liners an den Lagerbehälterboden

Die notwendige Verformungskraft für den Metall-O-Ring wird vom Sekundärdeckel über die Abschirmung aufgebracht. Die Abschirmung selbst bildet eine mit Blei gefüllte Stahlhülle. Der Sekundärdeckel ist mit einem Gewinde geringer Steigung versehen. Die geringe Steigung gewährleistet die erforderliche gleichmäßige Kraftverteilung über dem Umfang des Metall-O-Rings.

Der Primärdeckel -Lagerschachtabschluß- dient u.a. dem Schutz gegen Einwirkungen von innen, z.B. den Absturz einer Transportflasche bei der Beladung des benachbarten Lagerschachtes. Dieser Deckel ist mit einem doppelten Dichtungssystem (Metall-O-Ring und Elastomer-Dichtung) ausgestattet. Sollten die vorgesehenen Dichtungssysteme versagen, so kann der Primärdeckel notfalls mit der Deckelscheibe des Lagerbehälters gasdicht verschweißt werden.



- | | |
|------------------|---------------------|
| 1. Abschirmung | 4. Primärdeckel |
| 2. Metall-O-Ring | 5. Sekundärdeckel |
| 3. Metall-O-Ring | 6. Elastomer-O-Ring |

Bild 4-11: Doppeldeckelsystem zur Lagerschachtabschirmung

4.3.2.3 Das Leckkontrollsystem

Der Lagerschacht wird nach dem gasdichten Verschluss durch das Doppeldeckelsystem evakuiert und mit Helium gefüllt. Dazu ist in der Deckelscheibe des Lagerbehälters eine Schachtbohrung mit Ventil vorgesehen (Bild 4-12). Im Anschluß daran wird das Ventil heliumdicht verschlossen und als zweiter Abschluß eine gasdichte Einkapselung mit einer Schweißhaube vorgenommen. Der Lagerschachtdruck beträgt im Normalbetrieb (200 Grad C) 1,8 bar. Zwischen dem Primär- und Sekundärdeckel ist konstruktiv ein laufend überwachbarer Hohlraum vorgesehen, der auf einem Druck von 0,8 bar gehalten wird. Als Kontrollgas bietet sich z.B. Argon an, da hierin sowohl von der Umgebung zuströmende Luft (Dichtungsdefekt am Primärdeckel) sowie aus dem Lagerschacht austretendes Helium (Dichtungsdefekt am Sekundärdeckel) nachweisbar sind. Die Kontrolle kann durch eine Meßanordnung realisiert werden, welche sequentiell alle dreißig Lagerschächte eines Behälters überprüft, indem das Gasvolumen aus dem Hohlraum in die Überwachungseinheit gesaugt wird.

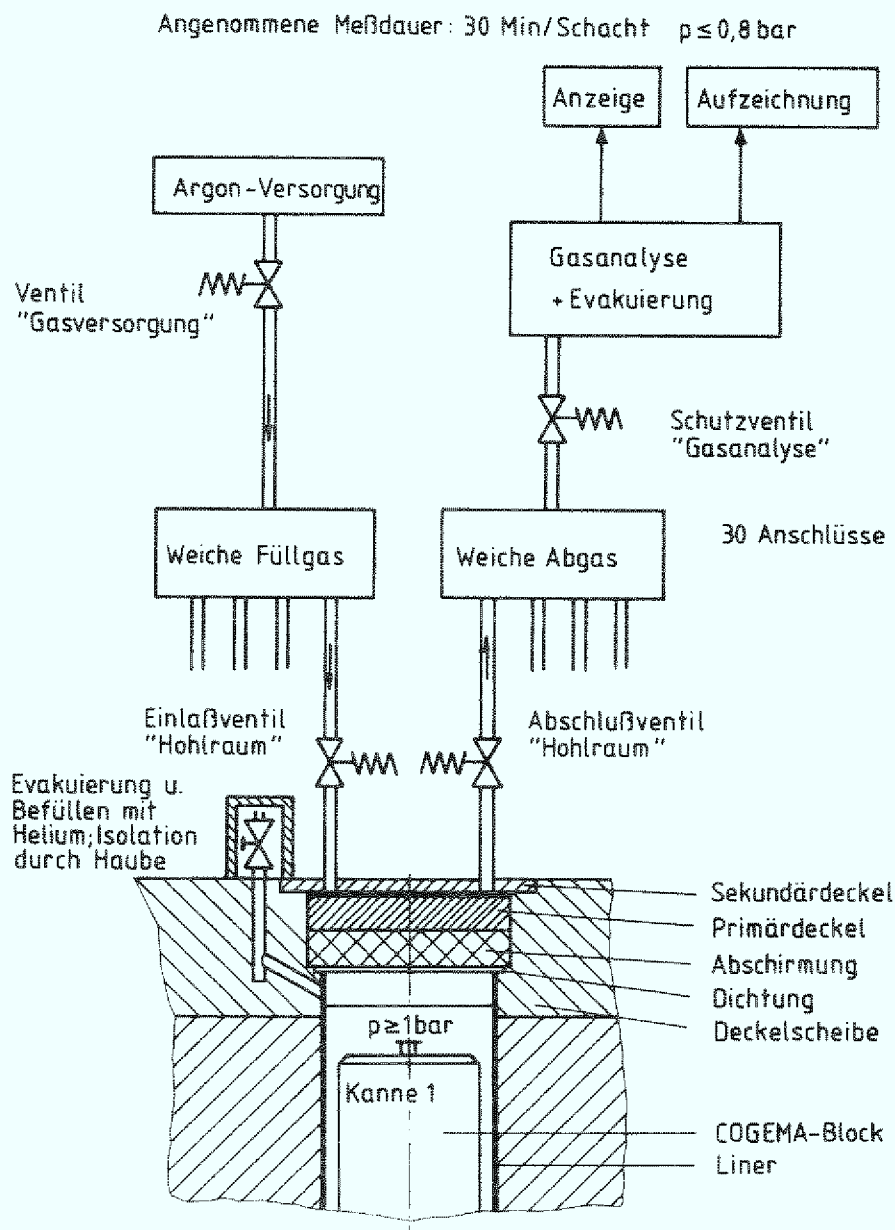


Bild 4-12: Leckkontrollsystem zur Integritätsüberwachung der eingelagerten Glasblöcke und des Doppeldeckelsystems

Die Messungen der einzelnen Lagerschächte erfolgen nach folgendem Schema:

- Die Meßanlage wird über die Weiche "Abgas" mit dem zu überprüfenen Lagerschacht verbunden.
- Abschlußventil "Hohlraum" und Schutzventil "Gasanalyse" werden geöffnet (Magnetschalter).

- Die Vakuumpumpe der Gasanalyse evakuiert den Kontrollraum.
- Das Gasvolumen wird analysiert, die Meßwerte werden in der Warte angezeigt und aufgezeichnet.
- Bei Überschreitung wird eine Alarmmeldung in der Meßwarte ausgelöst.
- Nach der Messung schließen das Schutzventil "Gasanalyse" und das Abschlußventil "Hohlraum" wieder.
- Zur Füllung des evakuierten Kontrollraumes wird die Einlaßstrecke über die Weiche "Füllgas" mit der Kontrollgasversorgung (z.B. Argon) verbunden.
- Die Ventile "Gasversorgung" und "Einlaß Lagerschacht" geben die Verbindung frei. Der Kontrollraum kann nun mit frischem Gas befüllt werden. Es strömt bedingt durch das "Vakuum" selbständig in den Kontrollraum zwischen Primär- und Sekundärdeckel ein.
- Nach Erreichen des Fülldruckes von 0,8 bar schließen die Zuströmventile wieder. Die Messung ist somit abgeschlossen.

Wegen der erwarteten geringen Leckagemengen und des niedrigen Gefährdungspotentials kann von einer Kontrolle der Lagerschächte im Tagesrhythmus ausgegangen werden.

4.3.3 DIE SPANNKABEL ZUR AXIALEN VERSPANNUNG DES LAGERBEHÄLTERS

Der aus achtzehn Scheiben aufgebaute Lagerbehälter wird mit Hilfe von Spannkabeln vorgespannt. Sie dienen hauptsächlich zur Aufnahme der bei eventuellen äußeren Einwirkungen auftretenden Kraftkomponente in axialer Richtung. Der Auslegungsdruck wird auf 10 bar festgelegt.

Die Spannkabel bestehen aus einem Bündel gezogener Spanndrähte in einem Hüllrohr, das den Gleitkanal bildet. Die einzelnen Spanndrähte werden durch die Bohrlöcher der aus Stahl bestehenden Ankerkörper (Bild 4-13) geführt und an den Enden in Form eines Kopfes gestaucht. Stauchvorgang, Form und Abmessungen der Stauchköpfe sind so gewählt, daß die statische Zugfestigkeit des Drahtes ohne Schlupf oder Verschiebung erreicht und gleichzeitig die höchstmögliche Dauerschwingfestigkeit im zulässigen Spannungsbereich erzielt werden.

Auf den wegen der großen zu übertragenden Kräfte mit Trapez-Außengewinde versehenen Ankerkörper ist eine Stützmutter aufgeschraubt, die beim Spannvorgang nach Anheben des Ankerkörpers soweit angezogen wird, bis die gewünschte Vorspannung erreicht ist. Eine Verschleißschiene überträgt die Vorspannkraft (26 MN) auf den Lagerbehälter, die daraus resultierende Flächenpressung zwischen Mutter und Verschleißschiene beträgt 39 N/mm^2 . Nach Abschluß der Montage wird eine Dichtkappe über die Mutter gesetzt und mit der Verschleißschiene gasdicht verschweißt /4-8/.

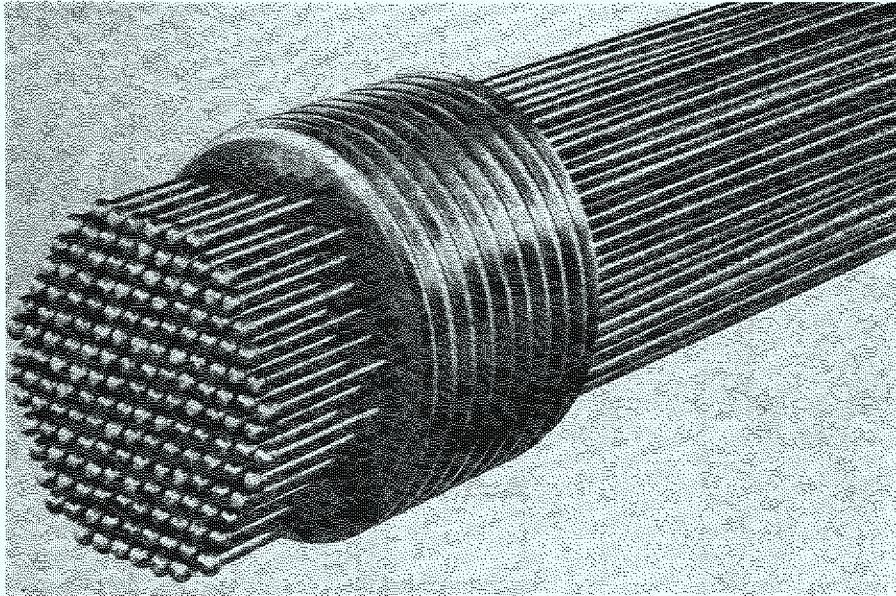


Bild 4-13: BBRV-Spannglieder mit Ankerkörper und gestauchten Köpfen
/4-8/

4.3.4 EVI-DECKEL

Den oberen Behälterabschluß bildet eine Scheibe, die die Wärmeabfuhrrichtungen des Behälterkühlsystems gegen EVI-Einwirkungen (Absturz) schützt (Bild 4-14). Bei der Montage des EVI-Schutzes können die zuvor montierten Sammler, Rohranschlüsse und Spannkabel durch die Wahl der Konstruktion nicht beschädigt werden. Über den Lagerschächten ist der gesamte Raum frei und wird durch demontierbare Kreissegmente nach oben hin abgeschlossen. In diesem Raum werden der Primär- und Sekundärdeckel der Lagerschachtabdichtung während des Be- oder Entladevorganges abgelegt. Ferner dient die EVI-Scheibe zur Aufnahme der Schleuse und somit auch der internen Transportflasche während der Be- oder Entladezyklen.

4.4 DIE DEN LAGERBEHÄLTER UMGEBENDEN EINBAUTEN

Innerhalb des Lagergebäudes befinden sich um den eigentlichen Lagerbereich zusätzliche Einbauten aus Grau- oder Roheisenguß. Sie haben die Aufgabe, im Störfall die in den Lagerbereich einströmende Luft so zu führen, daß eine optimale Kühlung des Lagerbehälters gewährleistet ist. Im Erdbebenfall tragen sie mit zur erforderlichen Begrenzung der Bewegung bei. Ferner ist in diesen Einbauten das Gebäudewandkühlsystem integriert.

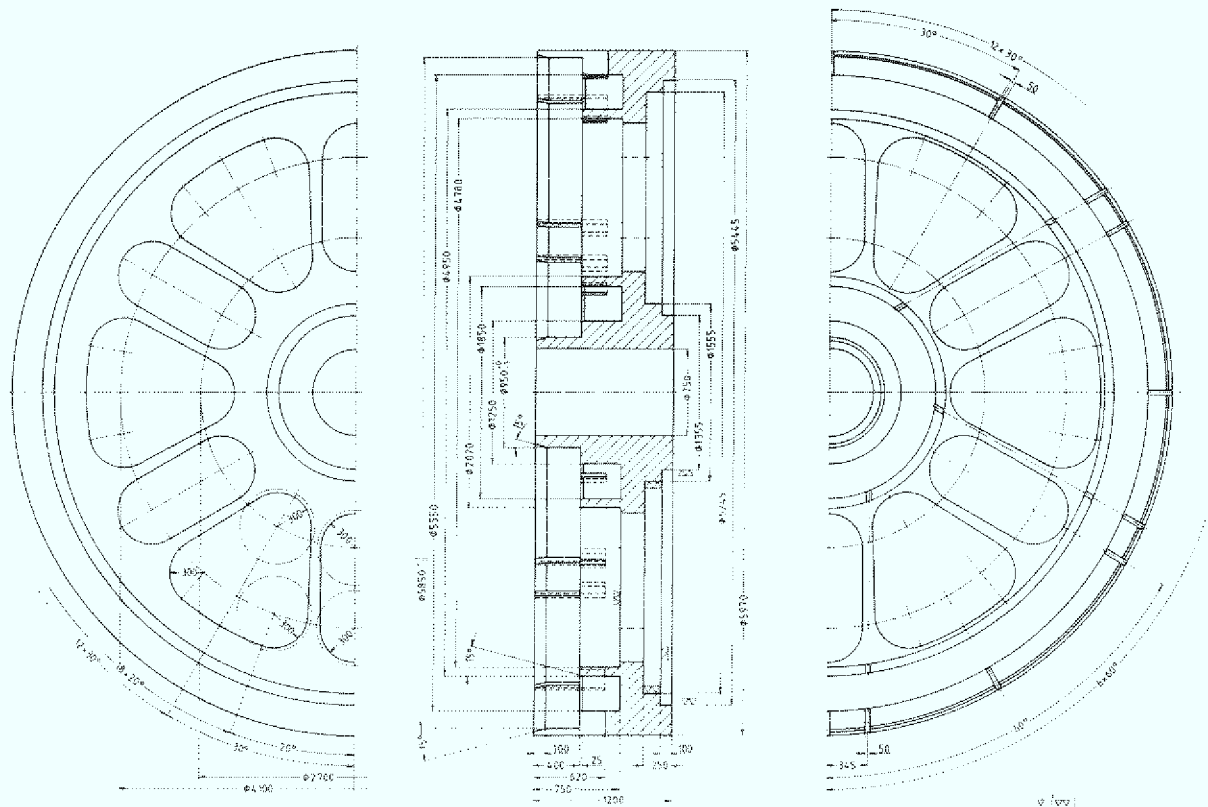


Bild 4-14: EVI-Deckel

Um den Behälter befindet sich eine U-förmige Segmentreihe, die mit ihrer großen, offenen Seite zum Lagerbehälter weist (Bild 4-15). Diese Ringsegmente sind so gestaltet, daß sie längs des Lagerbehälters 12 Strömungskanäle für die im Störfall einsetzende Naturkonvektionsluftkühlung bilden. Zur Vermeidung einer direkten Wärmeleitung in die zwölf Ringsegmente berühren ihre Schenkel die Außenwand des Lagerbehälters nicht. Der Wärmetransport von der Lagerbehälteroberfläche erfolgt somit nur durch Wärmestrahlung.

Zur Kühlung der Luftführungssegmente sind in den Segmenten Rohrkanäle (Hochofenbau) eingegossen. Der Wärmeübergang zu den Rohrkanälen erfolgt durch Strahlung (vom Lagerbehälter zu den Luftführungssegmenten) und durch Wärmeleitung (von der Innenwand der Luftführungssegmente zu den Wärmetauscherrohren). Die zu erwartende Wärmeleistung der Gebäudewandkühlung beträgt ca. 275 kW.

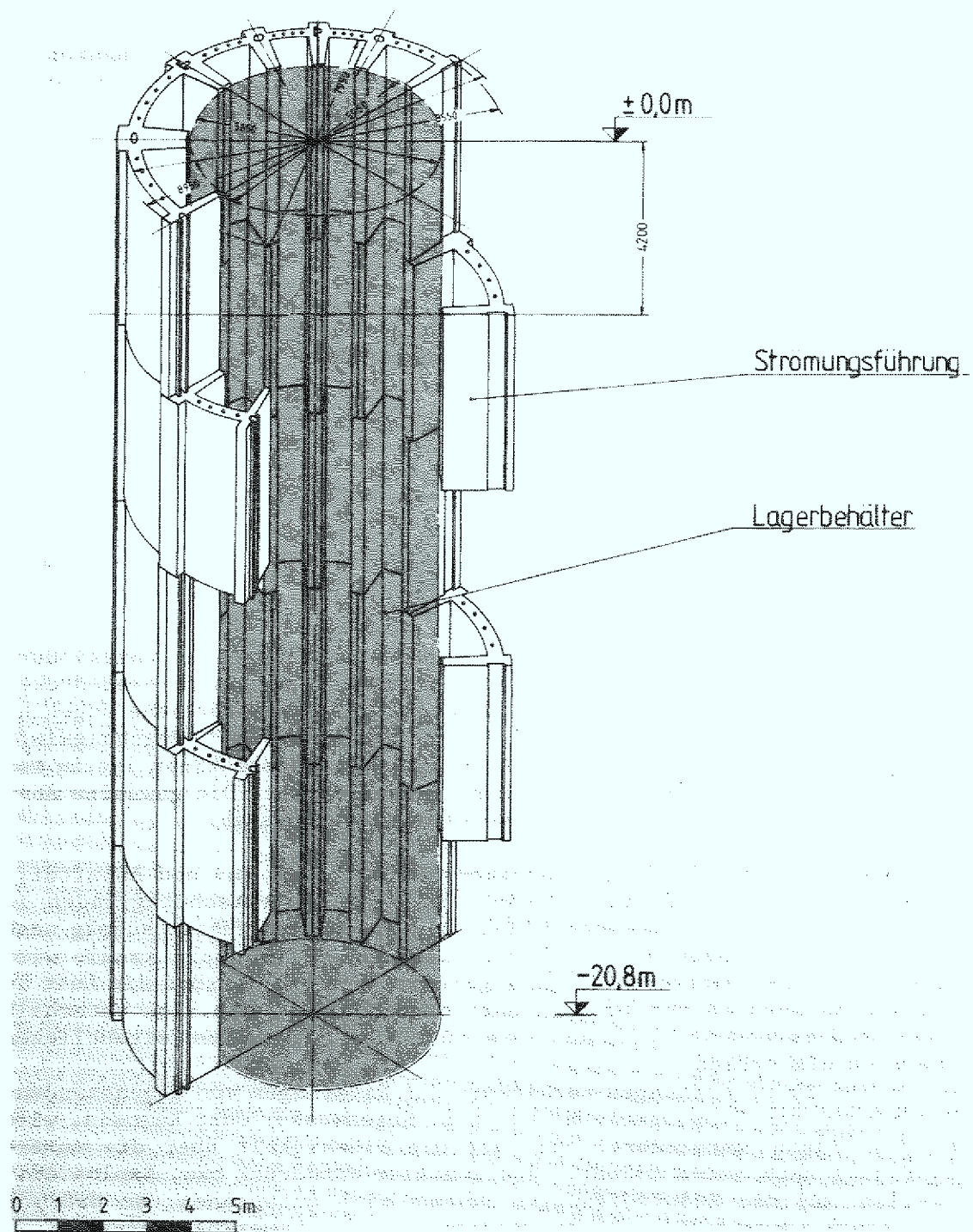


Bild 4-15: Einbauten zwischen Lagergebäudeinnenwand und Lagerbehälter

4.5 DAS BETONGEBÄUDE

Das Gebäude hat die Aufgabe, alle eingesetzten Systeme und Komponenten so zu umschließen, daß der bestimmungsgemäße Betrieb nicht durch Einwirkungen von außen gestört wird. Diese Ereignisse können sein:

- Flugzeugabsturz,
- Druckwelle einer chemischen Explosion,
- Flächenbrand,
- Ansaugen giftiger und explosionsfähiger Gase,
- Erdbeben,
- Hochwasser,
- Blitzschlag sowie
- Wind-, Schnee- und Eislasten.

Als oberer Abschluß des Schutzgebäudes wurde eine flugzeugabsturzsichere Prallplatte gewählt. Sie lagert mittels Stützen so auf der Gebäudedecke, daß zwischen Gebäudedecke und Prallplatte genügend Raum für eine ungehinderte Luftströmung während der Notkühlung des Lagers mit Umgebungsluft verbleibt. Der Schutz gegen schnell fliegende Militärmaschinen ist im wesentlichen durch die Wahl der Wandstärke gewährleistet. Die gewählte Auslegung deckt auch den Aufprall eines Verkehrsflugzeuges ab.

Für die erste Störfallkühlung (Naturkonvektion) sind Zu- und Abluftöffnungen eingeplant. Die Zuluftöffnungen sind aus Objektschutzgründen in ca. 12 m Höhe über der Geländeoberfläche angebracht und führen schräg nach oben bzw. senkrecht nach unten. Durch siebzehn zylindrische Kanäle wird die Luft zur ersten Luftverteilungskammer geführt. Von hier strömt die Luft in vierundzwanzig Kanälen zur zweiten Luftverteilungskammer, die sich unterhalb des Lagerbehälterbodens befindet. Die Luft kann nun in den eigentlichen Lagerbereich einströmen.

Gitter in den Zuluftöffnungen verhindern das Eindringen von Gegenständen. Das Eindringen von Flüssigkeiten, wie z.B. Regenwasser oder Kerosin, wird durch eine Kante verhindert, von der die Flüssigkeit über die untere Ansaugöffnung nach außen fließt. Horizontaler Winddruck bzw. Explosionsdruckwellen auf die Zuluftöffnungen können sich entspannen, so daß sie sich nur stark abgeschwächt und kurzzeitig im Lager bemerkbar machen.

Die Abluftschächte durchbrechen die Decke des Lagergebäudes. Sie sind diffusorartig erweitert und durch Gitter gegen das Eindringen von Gegenständen geschützt. Eine Aufstaurinne und eine Tropfkante verhindern das Eindringen von Flüssigkeiten in den Lagerbereich. Die Flüssigkeiten werden in Dränagen zur Außenwand des Betongebäudes geführt und dort abgeleitet (Bild 4-1).

5. BE- UND ENTLADUNG DES LAGERBEHÄLTERS

Dem Be- und Entladesystem des Übergangslagers kommt aufgrund des erheblichen Radioaktivitätsinventars der wärmeerzeugenden Elemente große Bedeutung zu. Um das Risiko einer Kontamination und Strahlenbelastung für das Bedienungspersonal zu minimieren, sowie die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls möglichst klein zu halten, sind besonders hohe sicherheitstechnische Anforderungen an dieses System zu stellen.

Bei der Auslegung des Beladesystems wurden daher folgende Kriterien berücksichtigt:

- Sicherheit
 - Anzahl der Umladungen von der Übernahme aus dem Transportbehälter bis zur Einlagerung in den Lagerbehälter
 - Strahlenbelastung des Bedienungspersonals
 - Anzahl der Koppelvorgänge zwischen Greifer und Kanne
 - Handhabung der zugehörigen Einrichtungen
 - Verfügbarkeit des Systems
- Konstruktion
 - schaltungstechnischer Aufwand
 - Baumaße
 - Gewicht
 - Anzahl der Komponenten
 - Fertigung
 - neuartige Komponenten
- Anzahl der Positionierungen des internen Transportbehälters auf die Schleuseneinrichtungen
- Kosten

Die einfache Handhabung der COGEMA-Kannen und die Sicherheit des Bedienungspersonals während des Be- und Entladevorganges standen im Vordergrund der Überlegungen. Weitere Zielvorstellungen, wie die einfache Fertigung und die leichte Montage der Komponenten, wurden bei der Konstruktion berücksichtigt. Die sicherheitstechnische Auslegung der Krananlage muß nach der KTA-Regel 3902 erfolgen.

Unter Berücksichtigung der erwähnten Randbedingungen wurde der Ablaufplan (Bild 5-1) zur Be- und Entladung des Übergangslagers festgelegt.

Die Anlieferung der HAW-Glasblöcke an den Standort des Übergangslagers geschieht in speziellen Transportbehältern (Typ B(U)). Die Einschleusung der HAW-Glasblöcke in die Übernahmestation und der Transport in den Lagerbereich geht in folgenden Schritten vor:

- Vorbereiten des Transportbehälters, d.h. das Entfernen der Stoßdämpfer und des äußeren Deckels
- Aufrichten des Transportbehälters und Ankoppeln an die Übernahmestation

- Ankoppeln der Deckelflasche an die Schleuse der Übernahmestation zur Aufnahme des Transportbehälterdeckels
- Einschleusen des Transportbehälterdeckels (Sekundärdeckel) in eine Deckelflasche
- Abkoppeln der Deckelflasche
- Ankoppeln der internen Transportflasche
- Einschleusen einer COGEMA-Kanne in die interne Transportflasche
- Abkoppeln der internen Transportflasche
- Transport in den Lagerbereich.

Der Vorgang des Einschleusens von COGEMA-Kannen in die internen Transportflaschen wird so oft wiederholt, bis der Transportbehälter entleert ist. Hiernach erfolgt das Entkoppeln des Transportbehälters von der Übernahmestation in umgekehrter Reihenfolge. Das Einlagern der COGEMA-Kannen in den Lagerbehälter wird mit Hilfe der internen Transportflasche direkt vorgenommen. Hierzu sind einige Vorbereitungen notwendig:

- Primär- und Sekundärdeckel der Lagerschachtabdichtung demontieren und ablegen
- Behälterschleuse auf den EVI-Deckel montieren
- Lagerschachtabschirmung entfernen.

Die Beladung kann nun vorgenommen werden. Dazu werden

- die interne Transportflasche auf die Behälterschleuse aufgesetzt,
- der Deckel der Transportflasche unter Gewährleistung der Abschirmung abgenommen,
- die COGEMA-Kanne durch die Krananlage aufgenommen und auf die gewünschte Lagerposition abgesenkt.

Eine eingehende Beschreibung der Komponenten des Beladesystems ist der Literatur /5-1/ und /5-2/ zu entnehmen.

5.1 HANDHABUNGSABLAUF IN DER ÜBERNAHMESTATION

Die COGEMA-Kannen werden in einem speziellen Transportbehälter (z.B. POLLUX bzw. TN 1300) auf einem Schienen- oder Straßenfahrzeug in den Anlieferungsbereich des Übergangslagers auf eine Hebebühne gefahren. Dort erfolgt die Demontage der Stoßdämpfer und des äußeren Behälterdeckels. Nach dem hydraulischen Aufrichten des Transportbehälters werden die Schrauben des inneren Deckels gelöst. Mit Hilfe der Hebebühne wird der Waggon mit dem Transportbehälter angehoben und der Transportbehälter an die Übernahmestation andockt (Bild 5-2). Die Deckelflasche, die an die Schleuse der Übernahmestation angekoppelt und durch eine Sicherheitsverriegelung mit ihr verbunden ist, nimmt den Sekundärdeckel des Transportbehälters auf. Der Deckel (oberer Abschluß) der Deckelflasche wird abgenommen. Zu diesem Zeitpunkt wird die Abschirmung durch das Gehäuse des Hubmagneten gewährleistet.

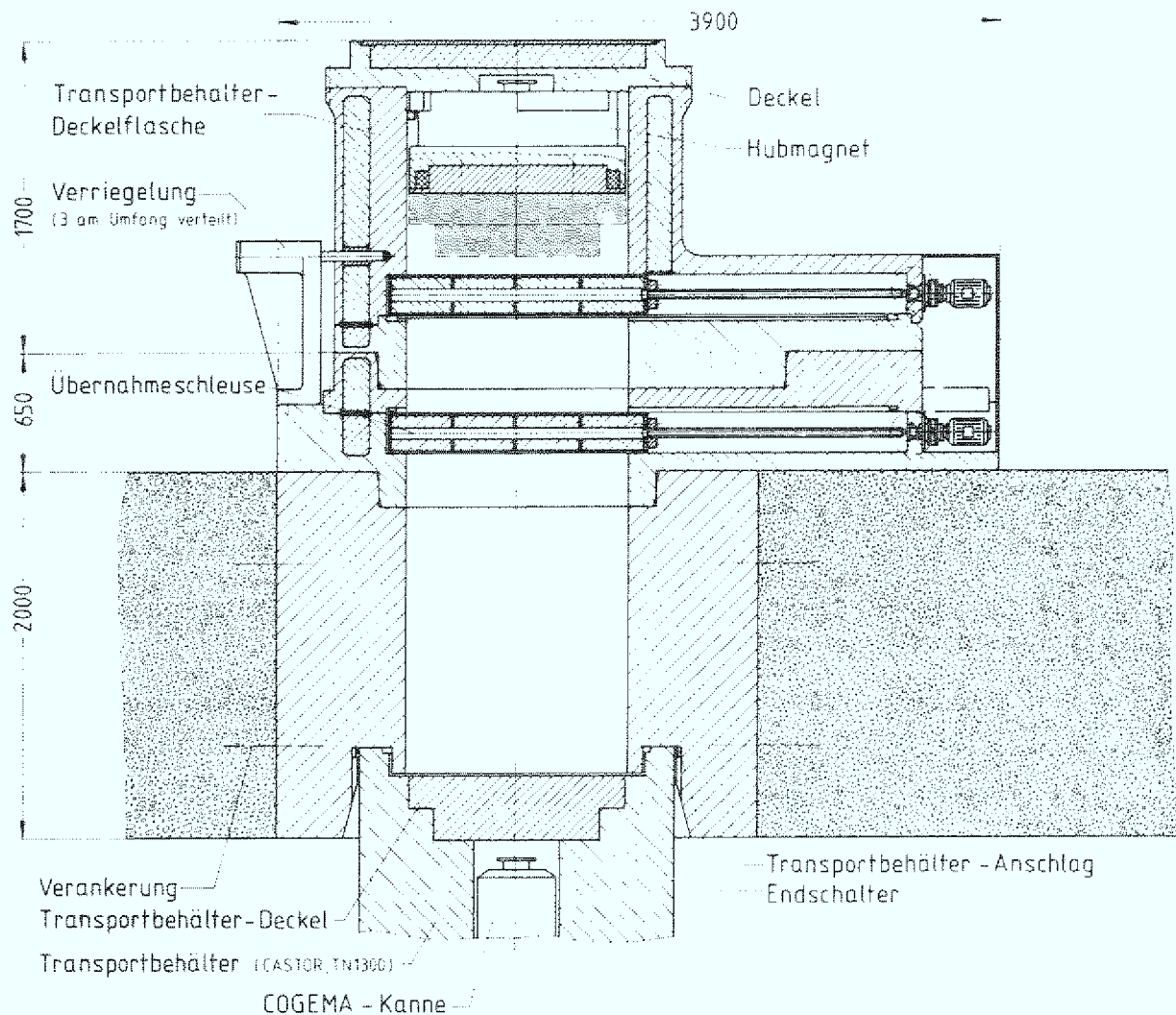


Bild 5-2: Gesamtansicht der Einschleusevorrichtung mit aufgesetzter Transportbehälter-Deckelflasche

Am Hallenkran hängen ein horizontales Drehwerk, eine Abschirmung und eine Greifervorrichtung zur Aufnahme des Hubmagneten (Bild 5-3). Der Bajonett-Verschluß am Hubmagnet läßt sich durch Betätigen des Horizontal-drehwerkes um 60 Grad drehen und in Stellung "Öffnen" bringen. Die Schieber in Flasche und Schleuse werden geöffnet. Hiernach kann das Absenken des Hubmagneten erfolgen, während des Absenkens legt sich die Abschirmung auf die Deckelflasche. Nachdem der Hubmagnet den Transportbehälter-deckel erreicht hat, wird ein Magnetfeld aufgebaut und der Deckel angehoben. Der Transportbehälterdeckel wird in die Flasche gezogen und mittels des Bajonett-Verschlusses in hängender Position verriegelt. Gleichzeitig schließen die Schieber. Nun erfolgt nach dem Lösen des Greifers das Auflegen und Befestigen des äußeren Deckels, die Sicherheitsverriegelung öffnet sich und die Deckelflasche wird vor der Schleuse abgenommen und in der Übernahmestation abgesetzt.

Zur Übernahme der COGEMA-Kannen aus dem Transportbehälter wird die interne Transportflasche auf die Schleuse gesetzt und verriegelt. Nach der Demontage des Deckels der internen Transportflasche nimmt der am Kran der Übernahmestation befestigte Greifer-A (Greifer-Außen) die Aufnahmevorrichtung des in der Transportflasche befindlichen Greifers-I (Greifer-Innen) auf, und das horizontale Drehwerk entriegelt das Bajonett. Die Abschirmung erfolgt durch die innere Greifeinrichtung. Nach dem Auffahren der Schieber in Flasche und Schleuse läßt sich die Hebeeinrichtung absen-

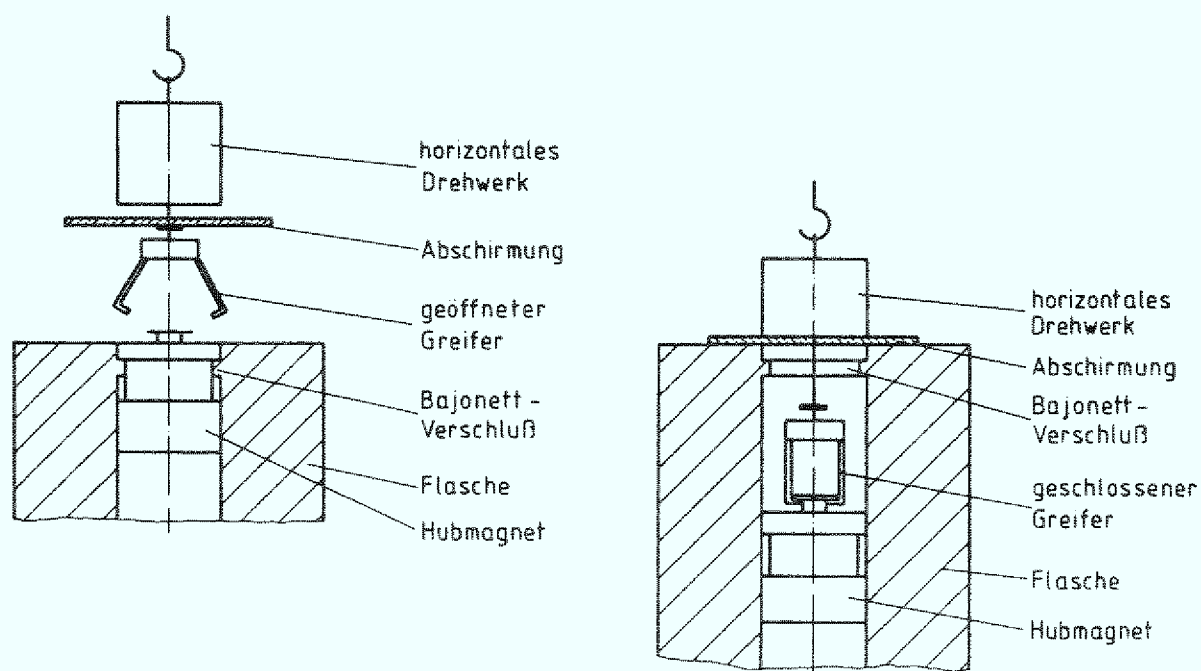


Bild 5-3: Schematische Darstellung des Greifvorganges

ken. Die Abschirmung legt sich dabei auf den Hals der internen Transportflasche. Die COGEMA-Kanne wird im Transportbehälter durch den Greifer-I aufgenommen und in die Flasche gezogen. Die Schieber der Flasche und der Schleuse schließen sich wieder. Das Bajonett wird verriegelt, der Greifer-A entlastet sowie der Deckel auf die interne Transportflasche gelegt und verschraubt. Die COGEMA-Kanne ist im internen Transportbehälter mit dem Greifer-I form- und kraftschlüssig verbunden. Nach dem Öffnen der Sicherheitsverriegelung kann der interne Transportbehälter in den Lagerbereich gefahren werden.

5.2 HANDHABUNGSABLAUF BEI DER EINLAGERUNG

Um eine COGEMA-Kanne in die gewünschte Lagerposition eines vorab bestimmten Lagerschachtes einzulagern, sind folgende Vorarbeiten durchzuführen:

Das Kreissegment, das im EVI-Schutz die benachbarten Lagerschächte abdeckt, wird demontiert. Nach dem Lösen der Schrauben nimmt der Hallenkran den Primärdeckel auf und setzt ihn auf dem benachbarten Lagerschacht ab. Anschließend dreht man den Sekundärdeckel aus der Deckelscheibe des Lagerbehälters heraus und legt ihn auf den Primärdeckel. Nun werden das Kreissegment wieder mit dem EVI-Deckel verschraubt, die Abdeckung der Lagerschachtposition (Bestandteil des EVI-Deckel-Kreissegmentes) entfernt und die Behälterschleuse aufgesetzt. Das Zentrierrohr der Behälterschleuse (Bild 5-4) ragt bis in die Deckelscheibe des Lagerbehälters hinein. Die auf die Behälterschleuse aufgesetzte Flasche kann nun die Lagerschachtabschirmung aufnehmen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Abschirmung

durch Stopfen, die im Hebesystem integriert sind, gewährleistet. Der Hallenkrane, an dem ein horizontales Drehwerk, eine Abschirmung und der Greifer-A hängen, erfaßt die Aufnahmevorrichtung des internen Greifers-I. Der mit einem Bajonett-Verschluß ausgestattete Greifer-I wird durch Verfahren des Horizontaldrehwerkes um 60 Grad gedreht, entriegelt und nach dem Öffnen der Schieber in Flasche und Behälterschleuse abgesenkt. Über die im Kran integrierte Wegmessung und die seitliche Führung des Greifers-I kann die Lagerschacht-Abschirmung, die als letzte Abdichtung den Lagerschacht noch verschließt, genau angefahren und aufgenommen werden. Eine Kraftmessung überwacht, ob die Lagerschacht-Abschirmung in den Schalen des Greifers-I hängt. Sie wird in die Flasche gezogen, das Bajonett verriegelt, die Schieber von Flasche und Behälterschleuse geschlossen, der Greifer-A entriegelt, der Deckel auf die Flasche gelegt und befestigt. Nach dem Lösen der Verriegelung kann die Flasche -sie enthält die Lagerschacht-Abschirmung- mit Hilfe einer am Hallenkrane hängenden Traverse zur Abstellposition gebracht werden.

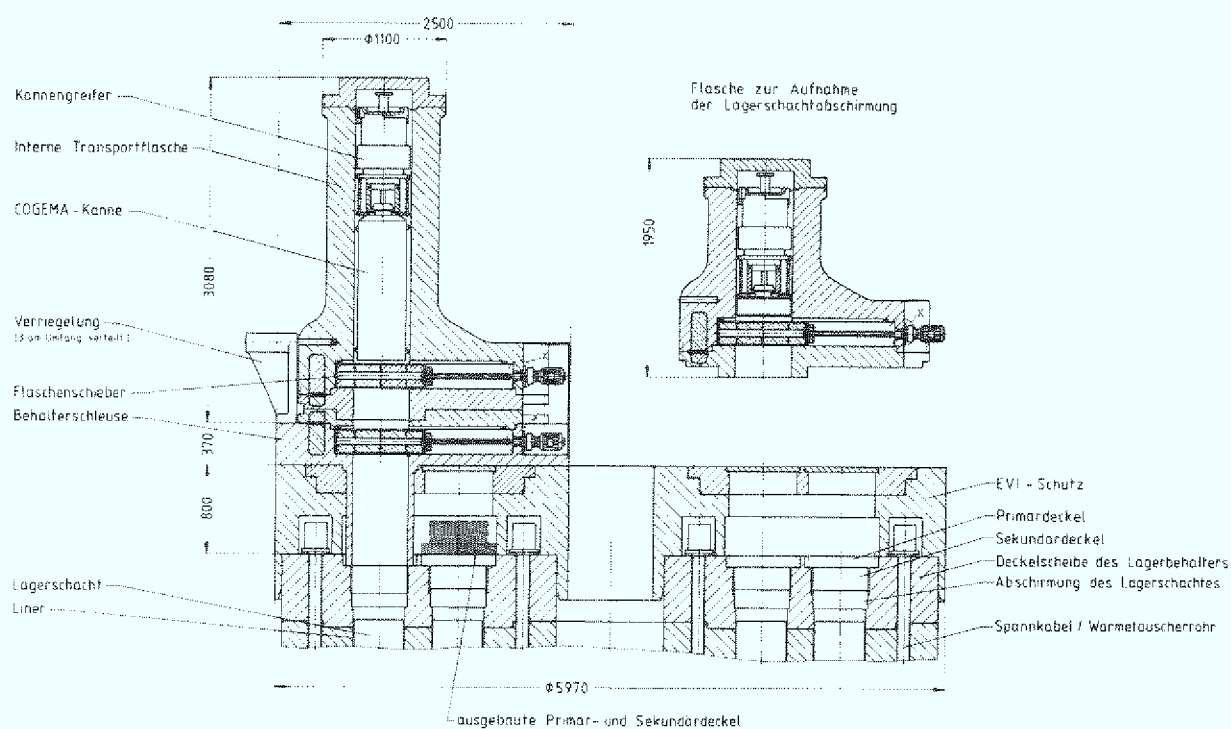


Bild 5-4: Gesamtansicht der Einschleusevorrichtung am Lagerbehälter mit aufgesetzter, interner Transportflasche

Der Hallenkran fährt mit der Traverse in die Vorhalle des Lagerbereiches, hebt die interne Transportflasche vom Beladewagen, befördert sie in den Lagerbereich und setzt sie auf der Behälterschleuse ab. Die Sicherheitsverriegelungen fahren in die dafür vorgesehenen Öffnungen der internen Transportflasche ein. Die Aufnahme der in der Transportflasche am internen Greifer-I hängenden COGEMA-Kanne geschieht in der zuvor beschriebenen Weise. Erst wenn die Kraftmessung das Aufnehmen der Kokille anzeigt, öffnen die Schieber in der internen Transportflasche und der Behälterschleuse. Die Lagerposition im Lagerschacht wird in die Elektronik des Hallenkranes eingegeben und die COGEMA-Kanne dorthin abgesenkt. Die Überwachung des Weges erfolgt automatisch. Um ein hartes Aufsetzen der Kanne zu vermeiden, erfolgt die Absenkung der letzten Zentimeter bis zur Lagerposition langsamer. Hat die COGEMA-Kanne in der gewünschten Lagerposition aufgesetzt, entriegelt der Greifer-I automatisch durch Entlastung. Er wird in die interne Transportflasche zurückgezogen. Nach Schließen der Schieber und Ablegen des Greifers-I auf dem Bajonett entriegelt der am Hallenkran hängende Greifer-A. Der Deckel wird auf die interne Transportflasche gelegt und mit ihr verschraubt. Die Sicherheitsverriegelung öffnet und die interne Transportflasche kann zur Aufnahme einer neuen COGEMA-Kanne in die Übernahmestation zurückgefahren werden.

5.3 DER MECHANISCHE KANNENGREIFER

Der Greifer ist zur kraft- und formschlüssigen Aufnahme einer COGEMA-Kanne ausgebildet. Das mechanische Greifen und Lösen erfolgt durch vertikale Hubbewegungen.

Der Greifer besteht im wesentlichen aus zwei Tragschalen, die die COGEMA-Kanne aufnehmen. Eine Zentrierglocke erlaubt das sichere Aufsetzen des Greifers auf die Kanne. Zwei Führungsplatten dienen zusätzlich als äußere, radiale Führung; untereinander sind sie mit Tragstangen verbunden und bilden so die Umschließung des Greifers. Im Inneren sind die Schaltelemente, Schaltnocken, Freilauf, Zahnstange und Zahnrad untergebracht. Sie übernehmen die Schaltung des mechanischen Greifers (Bild 5-5).

Der Greifer wird mit geöffneten Tragschalen auf die Aufnahmevorrichtung der COGEMA-Kanne abgesenkt. Der Schaltnocken verhindert, daß die Tragschalen ungewollt zufallen. Die Zentrierglocke, die mit einer im oberen Bereich angeordneten Zahnstange fest verbunden ist, setzt auf den Kannenhals auf. Der Träger mit der darin montierten Lagerung des Zahnrades senkt sich durch die Schwerkraft weiter ab. Dabei rollt das Zahnrad an der Zahnstange herunter, dreht den Schaltnocken um 45 Grad weiter und gibt die im Träger gelagerten Tragschalen frei, die sich mit Hilfe einer Zugfeder um den Kannenhals legen. Der Hebevorgang kann nun erfolgen. Dabei werden die zwei Führungsplatten, die über Tragstangen miteinander verbunden sind, angehoben. Die untere Führungsplatte drückt gegen die Tragschalen und verhindert deren ungewolltes Öffnen. Nach dem Durchfahren eines vorbestimmten Hubes hebt auch der Träger mit den Tragschalen an. Das Zahnrad rollt auf der Zahnstange in seine Ausgangsposition zurück, wobei der eingebaute Freilauf ein Drehen des Schaltnockens verhindert.

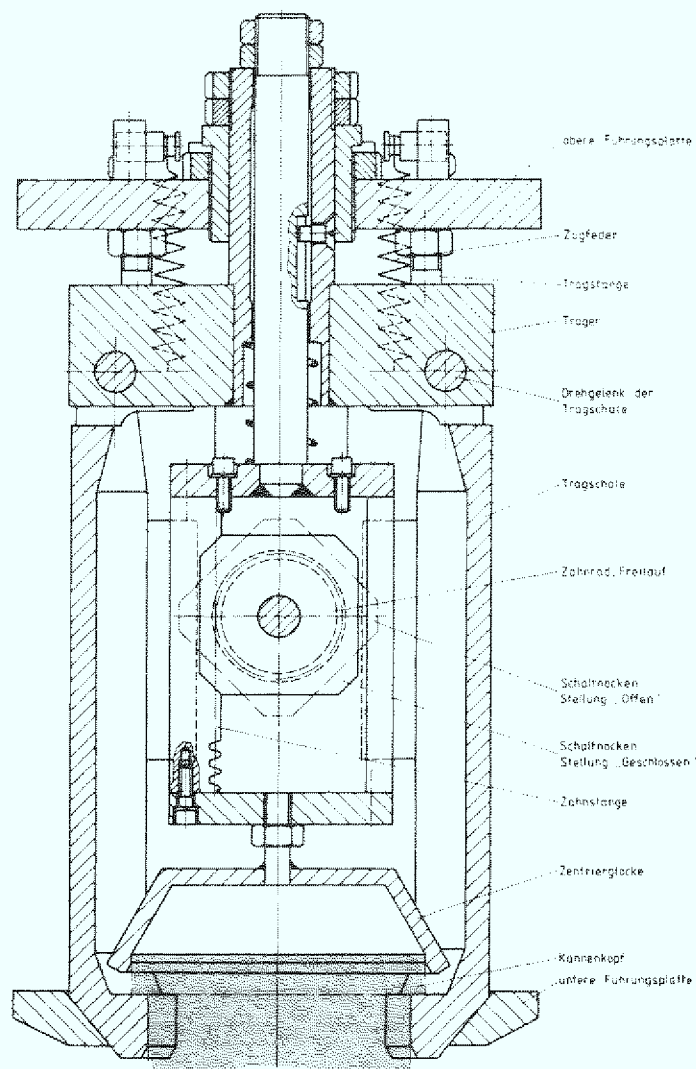


Bild 5-5: Kannengreifer in geschlossener Stellung /5-3/

Vor dem Lösen des Greifers muß die Entlastung erfolgen. Zuerst durchlaufen die beiden Führungsplatten ihren vorgegebenen Hub, wobei die obere sich auf den Träger legt und die Tragschalen freigibt. Der Greifer senkt sich aufgrund seines Eigengewichtes weiter ab. Dabei rollt das Zahnrad wieder auf der Zahnstange ab, der Schaltnocken dreht sich um 45 Grad weiter und drückt die Tragschalen auseinander. Nun wird der Greifer angehoben, wobei der Schaltnocken in der Stellung "Offen" stehen bleibt /5-3/.

Bei zwei in Reihe geschalteten Greifern erfolgt die Entkopplung jeweils durch unterschiedliche Schaltwege.

5.4 ELEKTRISCHER SCHALTABLAUF BEI HANDHABUNGEN IN DER ÜBERNAHMESTATION

An die elektrische Schaltung sind zur Sicherstellung der Strahlenabschirmung und wegen der "blinden" Handhabung der Kokillen besondere Anforderungen zu stellen. Die Schieber in der Übernahmeschleuse und der Deckel- bzw. Transportflasche dürfen nur geöffnet werden, wenn der externe Transportbehälter in das Koppelstück hineinragt und die Verriegelungen eingearastet sind. Diese Forderungen wurden bei der Aufstellung des Schaltplanes berücksichtigt.

Die elektrische Schaltung besteht aus einem Hauptstromkreis und einem Steuerstromkreis. Im Hauptstromkreis sind die beiden Elektromotoren der Schieberverstellungen in einer Wendeschützschtaltung geschaltet. Der Strom fließt durch die Überstromorgane und die Schütze zu den Elektromotoren. Der Rechts- und Linkslauf jedes Motors wird mit einem separaten Schütz gesteuert. Zusätzlich sind die Motoren über Sicherungen vor Überlastung geschützt.

Der Stromlaufplan (Bild 5-6) des Steuerstromkreises stellt die Stromwege der Schaltung dar. Bei eingeschalteten Sicherungen e(1) bis e(4) müssen die beiden Endschalter im Transportbehälter-Anschlag durch den angekoppelten externen Transportbehälter betätigt und die drei Endtaster der Verriegelung durch Einfahren der Sicherheitsstifte in die aufgesetzte Deckel- bzw. Transportflasche geschlossen sein. Erst wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, läßt sich der Stromkreis für die Schützenanregung schließen. Der Einschaltstrom fließt, wenn die Taster "Öffnen" für die Flasche und die Schleuse gedrückt werden, indem die Schütze für den Rechtslauf der Motoren anziehen. Über die Selbsthaltekontakte der Schütze fließt der Haltestrom und der Stromkreis bleibt geschlossen. Die Motoren werden abgeschaltet, sobald die Schieber die Stellung "Offen" erreicht haben und die als Öffner ausgeführten Endschalter betätigen. Nun kann die geplante Handhabung bei geöffneten Schiebern erfolgen. Sollen die Schieber wieder geschlossen werden, sind die Taster "Schließen" für Flasche und Schleuse zu betätigen. Die Schütze für den Linkslauf der Getriebemotoren ziehen an. Über die Selbsthaltekontakte der Schütze fließt der Strom nun so lange, bis die Schieber die Stellung "Geschlossen" erreicht haben und die Endtaster öffnen.

Um die Sicherheit des Funktionsablaufes zu erhöhen, werden die Schütze für beide Drehrichtungen gegenseitig verriegelt. Es ist nicht möglich, die Drehrichtung zu wechseln, während der Motor läuft. Werden gleichzeitig die Taster "Öffnen" und "Schließen" betätigt, wird kein Stromkreis geschlossen und die Motoren laufen nicht an. Ein Not-Aus-Taster erlaubt es, den Stromkreis zentral zu unterbrechen. Die Krananlage ist während der Beladephase so mit dem Beladesystem verbunden, daß bei laufender Kabeltrommel bzw. abgespultem Seil keine Schieberverstellung möglich ist.

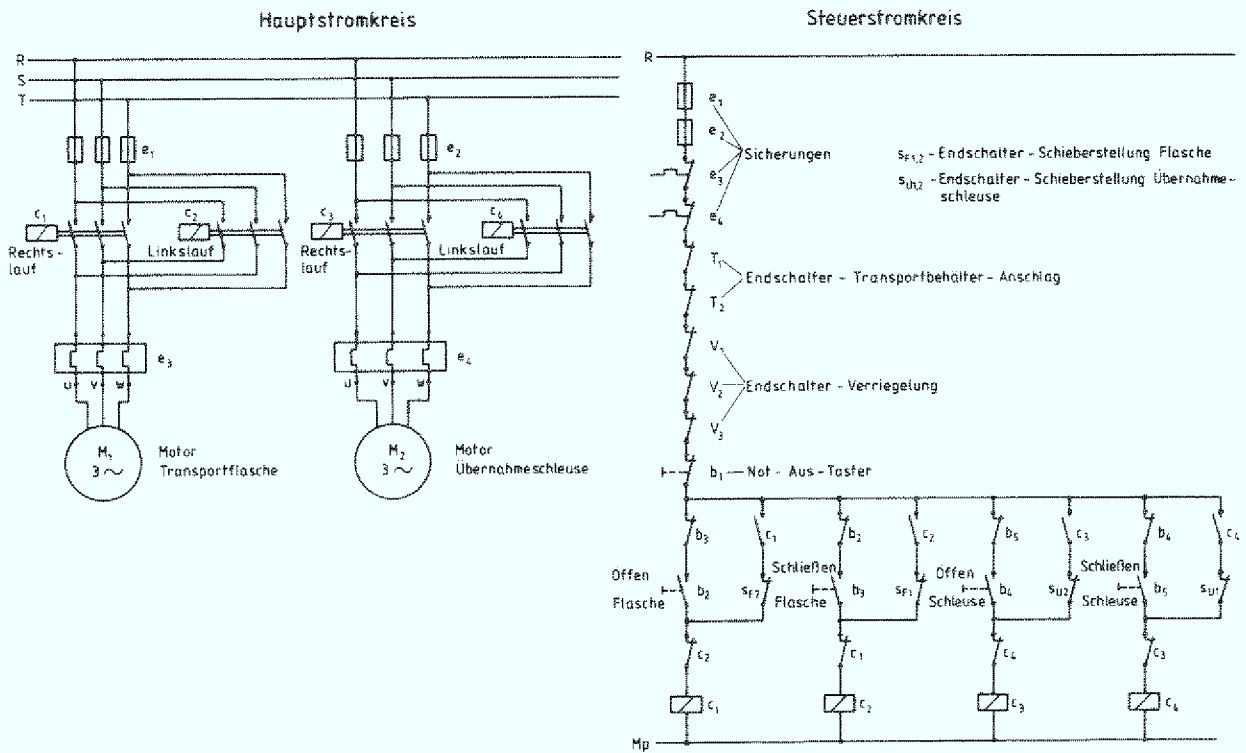


Bild 5-6: Elektrische Schaltung zur Ansteuerung/Verriegelung der Schieber

6. DAS BETRIEBSKÜHLSYSTEM ZUR WÄRMENUTZUNG

Die Nachzerfallswärmeabfuhr aus dem Übergangslager erfolgt durch ein dreifach redundantes Betriebskühlsystem. Dieses Kühlsystem ist in zwei Teilsysteme,

- das Behälterkühlsystem und
- das Gebäudekühlsystem,

untergliedert (Bild 6-1). Tabelle 6-1 zeigt die wesentlichen Daten des Betriebskühlsystems.

Behälterkühlsystem - aufgenommene Wärme - Massenstrom * Einzelkreislauf * Gesamtkreislauf - Betriebsdruck - Druckverlust (Einzelkreislauf) - Temperaturen * Eintritt * Austritt	700 kW 1,3 kg/s 62,4 kg/s 20 bar 0,3 bar 147 Grad C 150 Grad C
Gebäudekühlsystem - aufgenommene Wärme - Massenstrom * Einzelkreislauf * Gesamtkreislauf - Betriebsdruck - Druckverlust (Einzelkreislauf) - Temperaturen * Eintritt * Austritt	275 kW 0,8 kg/s 19,2 kg/s 3 bar 0,2 bar 58 Grad C 60 Grad C
Verluste	25 kW
Sekundärkreislauf (Beispiel) - Massenstrom * Einzelkreislauf * Gesamtkreislauf - Temperaturen im Fernwärmenetz * Vorlauf * Rücklauf	0,9 kg/s 2,7 kg/s 125 Grad C 42 Grad C

Tab.6-1: Daten des Betriebskühlsystems bezogen auf 1000 kW Gesamtleistung

Die zum sicheren Betrieb der Anlage erforderliche Zuverlässigkeit der Kühlsysteme läßt sich im wesentlichen durch die redundante und diversitäre Ausführung der relevanten Komponenten und Einrichtungen erreichen.

Die folgenden Ausführungen sind gültig für die Wärmeabgabe an ein Fernwärmenetz und auf eine Wärmeleistung des Übergangslagers von 1000 kW bezogen /6-1/.

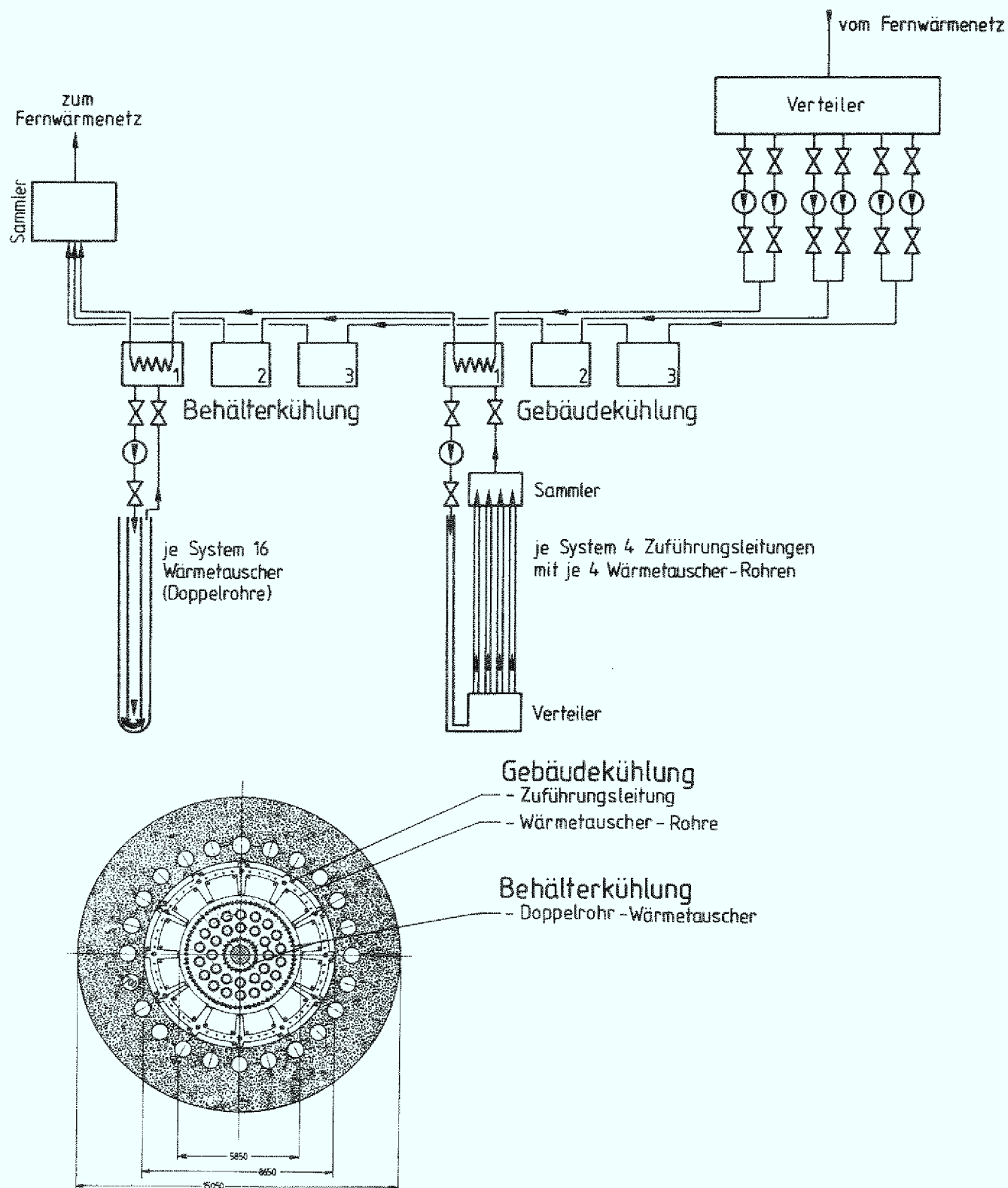


Bild 6-1: Schaltung des Betriebskühlsystems

6.1 AUFBAU DER EINRICHTUNGEN ZUR WÄRMENUTZUNG

Der Betriebskühlkreis (Bild 6-1) ist, wie bereits erwähnt, in zwei Systeme unterteilt, wobei jedes System aus drei separaten, unabhängig voneinander arbeitenden Kühleinheiten ($3 \cdot 100\%$) besteht.

Bei unvorhersehbaren Störungen, z.B. Defekten an Pumpen, Leitungen, Wärmetauschern usw., können einzelne Stränge oder ganze Systeme abgeschaltet werden. Eine ausreichende Kühlung des Lagers bleibt weiterhin gewährleistet. Zum Schutz der Rohrwandungen und Rohreinbauten vor Korrosion wird als Kühlmedium voll entsalztes Wasser (VE-Wasser) verwendet. Die dazu erforderlichen Aufbereitungsanlagen sind ebenso wie die Wärmetauscher und die benötigten Antriebseinheiten in einem Nebengebäude untergebracht.

Der Ausfall der Wärmesenke (Fernwärmenetz) wird durch den Einsatz von parallelgeschalteten, externen Luftkühlern mit Ventilatoren überbrückt.

Im Falle eines Zusammenbruchs der externen Stromversorgung werden sicherheitstechnisch relevante Einheiten, wie z.B. die Überwachung des Behälters, aus Batterien versorgt.

Zur sicherheitstechnischen Überwachung der Leitungen werden an geeigneten Stellen Temperaturfühler und Meßblenden installiert.

Bei Ausfall des gesamten Betriebskühlsystems stehen noch zwei unabhängige Notkühlssysteme (Naturkonvektionskühlung, Wasserberieselung) zur Verfügung.

6.1.1 DAS BEHÄLTERKÜHLSYSTEM

Den größten Teil (700 kW) der erzeugten Wärme führt das Behälterkühlsystem ab. Es ist aus 48 Doppelrohren (Bild 6-2), die als Wärmetauscher in Bohrungen des Lagerbehälters eingesetzt sind, aufgebaut. Die Doppelrohre sind so angeordnet, daß sie ein dreifach redundantes, unvermaschtes System bilden. Von diesen Doppelrohrwärmetauschern, die sich in 36 Bohrungen am Außenrand und 12 Bohrungen im zentralen Bereich des Lagerbehälters befinden, führen Verbindungsleitungen zu den im Nebengebäude liegenden Sekundärwärmetauschereinheiten. Der Systemdruck des Behälterkühlsystems von 20 bar liegt aufgrund der maximalen Wassertemperatur von 150 Grad C in einem Bereich, der selbst bei Temperaturerhöhung um 50 Grad C eine Dampfblasenbildung unterbindet.

Jeder Doppelrohrwärmetauscher ist in einem separaten Kreislauf eingebunden. An den Ein- und Austritten der Wärmetauschereinheiten des Sekundärsystems befinden sich angeflanschte Sammler, von denen für jedes Doppelrohr eine Zu- und Abflußleitung abzweigt. Das Kühlmedium (VE-Wasser) strömt am Austritt der Wärmetauschereinheit in den Sammler und wird von dort über sechzehn Kühlstränge mit je einer Umwälzpumpe angesaugt und zum Doppelrohr geleitet.

Durch den Einbau der Pumpen im niedergrädigen Strang des Kühlkreislaufs ist eine Überhitzung der Pumpenteile bei Anlaufvorgängen oder Störfällen weitgehend ausgeschlossen. Das Medium strömt nach Verlassen der Pumpe zum Lagerbehälter und durch das Innenrohr des Doppelrohrwärmetauschers zum Boden des Lagerbehälters, wird dort umgelenkt und steigt anschließend im Ringspalt mit ständig fortschreitender Temperaturerhöhung wieder auf.

6.2 SEKUNDÄRANLAGEN

6.2.1 DAS NEBENGEBÄUDE

Das Lager ist mit dem Nebengebäude (Bild 6-3), in dem sich die wärmetechnischen Anlagen sowie die Meß- und Überwachungseinrichtungen befinden, durch einen aus Stahlbeton gegossenen Rohrleitungstunnel verbunden. Der Verbindungstunnel liegt an den Enden, die lose mit den Gebäuden verbunden sind, so auf, daß leichte Verschiebungen der Gebäude gegeneinander nicht zu Spannungen und Rissen an den Anschlußstellen führen. Der Abstand Lager - Nebengebäude sollte möglichst kurz sein.

Der Verbindungstunnel ist in Höhe der Oberkante des Lagerbehälters in die Stahlbetonwandung eingesetzt. Er beinhaltet alle notwendigen Versorgungsleitungen, Rohrstränge und Rohrbündel sowie Leitungsanlagen zur Übermittlung von Meß- und Kontrolldaten.

Auf dem Flachdach sind Luftkühlereinheiten installiert, die bei Ausfall des Wärmeabnehmers für die Kühlung des Übergangslagers sorgen.

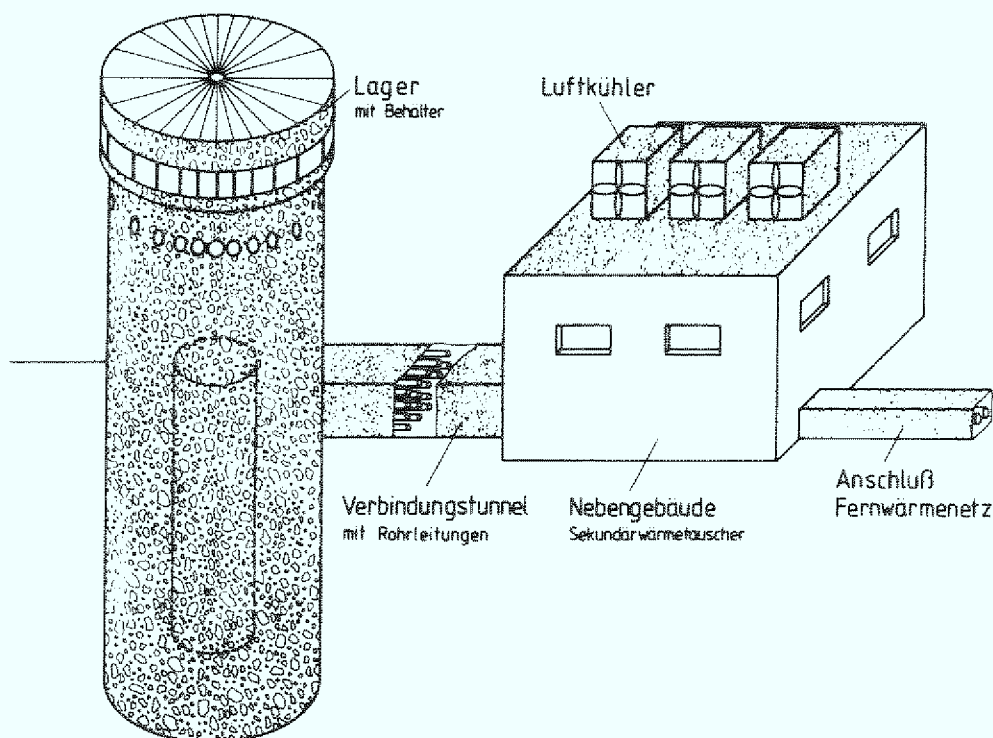


Bild 6-3: Gebäudeanordnung: Schutzgebäude - Nebengebäude

6.2.2 SCHALTPLAN DER WÄRMENUTZUNGSEINRICHTUNG

In Bild 6-4 ist die Schaltung der wasserdurchströmten Kühlanlagen zur Wärmenutzung dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur einer der drei parallelen Kühlstränge aufgeführt. Die Ventil- und Schieberstellungen sind für den Normalbetrieb eingetragen. Jedes System verfügt über eine eigene Einspeisung ins Fernwärmenetz, d.h. das Fernwärmenetz ist der einzige Verbindungspunkt der Wärmenutzungssysteme untereinander.

Zur Erläuterung der Schaltung werden nun die vier Kühlwasserkreisläufe

- Sekundärkreis (Fernwärmeanschluß),
- Behälterkühlkreis,
- Gebäudewandkühlung und
- Volumenausgleich

gesondert beschrieben.

6.2.2.1 Das Sekundärkühlsystem

Vom Fernwärmenetz strömt das entnommene Rücklaufwasser durch ein Hauptabsperrventil zur Pumpe. Die Pumpe ist redundant ausgeführt und kann nach Abschluß der Leitung durch ein vor- und nachgeschaltetes Ventil zur Wartung oder Reparatur ausgebaut werden. Sie überbrückt den Druckverlust des Sekundärmediums beim Durchströmen der Wärmetauschereinheiten. Das Sekundärkühlwasser durchströmt zunächst den Wärmetauscher des Gebäudewandkühlsystems. Die gewünschte Vorlauftemperatur wird im Wärmetauscher des Behälterkühlsystems erreicht. Anschließend gelangt das Kühlmedium über das Hauptabsperrventil in den Vorlauf des Fernwärmenetzes.

Da die Wärmeabgabemenge des Übergangslagers nicht zur Regelung der Vorlauftemperatur herangezogen werden kann, erfolgt sie durch Anpassung des entnommenen Massenstroms aus dem Verbrauchernetz.

Hierzu werden die Meßgrößen

- Rücklauftemperatur,
- Volumenstrom und
- Istwert der Vorlauftemperatur

erfaßt. Aus einem Vergleich von Soll- und Istwert der Vorlauftemperatur wird durch Drosseln in der Rohrleitung des Sekundärsystems der Volumenstrom korrigiert.

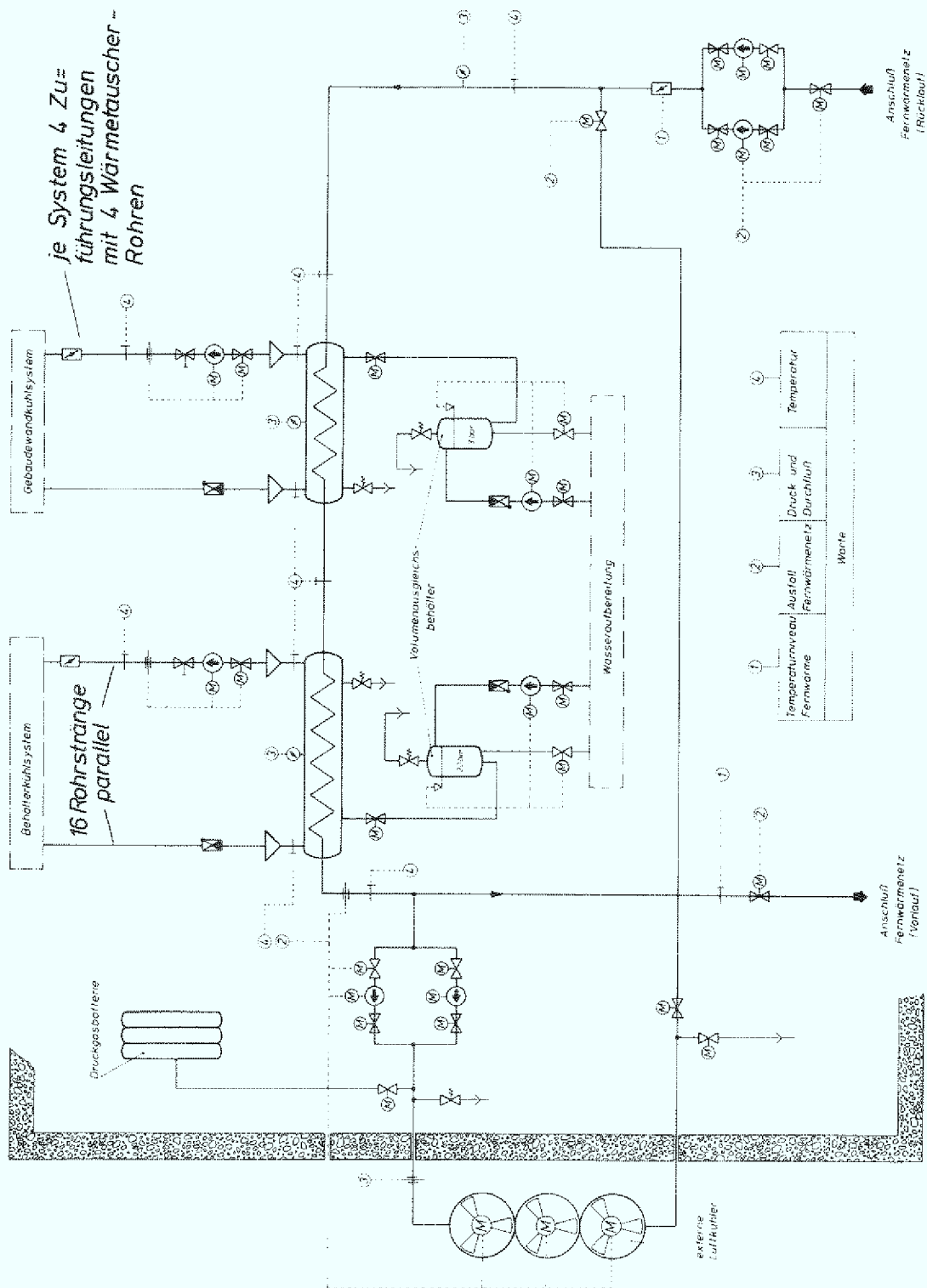


Bild 6-4: Schaltplan eines Stranges des Betriebskühlsystems sowie Meßwerterfassung und Hauptregelfunktionen (Ventilstellung für Normalbetrieb)

6.2.2.2 Der Behälterkühlkreislauf

Das vom Sekundärmedium im Trennwärmetauscher des Behälterkühlkreises abgekühlte Wasser strömt durch die Austrittsöffnung des Wärmetauschers in einen angeflanschten Verteiler. Hier verteilt sich der Massenstrom auf 16 Rohrstränge. Das Wasser wird in jedem Strang von einer Pumpe angesaugt. Sie fördert das Speisewasser durch den Rohrstrang aus dem Anlagengebäude durch den Rohrleitungstunnel zum Lagergebäude.

Im Lagerbehälter installierte Doppelrohrwärmetauscher übertragen die von den Spaltprodukten erzeugte Nachzerfallswärme an das Kühlmedium. Die Rückleitung des aufgeheizten Mediums zum Trennwärmetauscher erfolgt, wie schon beschrieben, in umgekehrter Reihenfolge. Vor Eintritt des Wassers in den Wärmetauscher werden alle 16 Einzelströme wieder in einem Sammler vereint.

Im Falle eines plötzlichen Kühlmittelverlustes im Kreislauf, hervorgerufen z.B. durch Rißbildung in Rohrleitungen oder Schweißnähten, wird der einzelne, defekte Kühlkreislauf automatisch stillgelegt. Bei einem Mediumverlust oder Motorausfall fällt sofort der von der Blende gemessene Differenzdruck ab. Die Druckmeßstelle ist über ein Regelsystem mit der Pumpe und dem vorgelagerten motorverstellbaren Schließventil verbunden. Bei Pumpenausfall schließt das Ventil und es kann keine Flüssigkeit mehr nachströmen. Ein Rückströmen vom Sammler in den defekten Strang verhindert das in jeder Leitung eingebaute Rückschlagventil. Dadurch ist die defekte Leitung in beiden Richtungen abgesperrt, so daß der Kühlbetrieb ungehindert fortgesetzt werden kann. Die überschüssige Wärme nehmen die benachbarten Doppelrohrwärmetauscher auf. Die Pumpen sind zwischen zwei Absperrventilen eingebaut, um ein leichtes Auswechseln bei Defekten zu ermöglichen.

Die Strömungswege von den einzelnen Doppelrohrwärmetauschern im Lagerbehälter zum zugeordneten Trennwärmetauscher im Nebengebäude sind unterschiedlich lang. Damit der Massendurchsatz trotz unterschiedlicher Rohrlängen in allen Kühlkreisen gleich groß ist, ist jeweils eine fest eingestellte Drosselklappe im niedergrädigen Strang eingebaut. Somit kann die Pumpe mit konstanter Drehzahl betrieben werden und braucht keine gesonderte Regelung.

Die Leistungsüberwachung des Kühlsystems wird mit Hilfe von Temperaturmeßstellen durchgeführt. Sie sind an den Ein- und Austrittsleitungen des Trennwärmetauschers sowie in jedem einzelnen Rohrstrang vorhanden.

Eine Druckmessung zur Überwachung des gesamten Systemdrucks, der beim Behälterkühlkreislauf 20 bar beträgt, wird im Trennwärmetauscher durchgeführt. Bei einer unvorhergesehenen Druckerhöhung und bei gleichzeitigem Versagen der Volumenausgleichsanlage öffnet das am Wärmetauscher angeschlossene Überdruckventil.

6.2.2.3 Der Gebäudewandkühlkreislauf

Aus dem dreifach redundant vorhandenen Trennwärmetauscher der Gebäudewandkühlung fließt das abgekühlte Wasser in einen Verteiler mit 4 Einzelrohranschlüssen. Eine in jedem Strang eingebaute Pumpe fördert das Wasser durch die Kühlleitungen. Die Zuführungsrohre verlaufen, wie schon bei der Erklärung des Behälterkühlkreises beschrieben, vom Anlagengebäude durch einen zentralen Rohrschacht zum Lagergebäude.

Im Lager sind die Zuführungsrohre mit den zugehörigen, in den Ringraumeinbauten installierten Wärmetauscherrohren -pro Zuführungsleitung 4 Wärmetauscherrohre- verbunden. Das Wasser in den Rohren nimmt die vom Lagerbehälter an die Gebäudewand abgestrahlte Wärmemenge auf und wird anschließend wieder zurück zum Trennwärmetauscher geleitet, wo es die Wärme an den Sekundärkreis abgibt.

Der weitere Aufbau und die Funktion dieses Kühlkreises sind mit der des Behälterkühlkreises identisch. Hier beträgt der Systemdruck wegen der niedrigen Temperaturen 3 bar.

6.2.2.4 Die Volumenausgleichsanlage

Die Volumenausgleichsanlage hat die Aufgabe bei Anfahrvorgängen, Mediumverlusten und -ausdehnungen den Betriebsdruck des Primärsystems zu halten und den damit verbundenen Volumenausgleich vorzunehmen.

Es sind zwei unabhängig voneinander arbeitende Volumenausgleichssysteme vorgesehen (Bild 6-3). Das System mit dem Betriebsdruck von 20 bar ist an den Trennwärmetauscher des Behälterkühlsystems angeschlossen. Dieser Betriebsdruck ist erforderlich, damit selbst bei Störfalltemperaturen von 200 Grad C keine Verdampfung eintritt. Die zweite, mit einem Druck von 3 bar gefahrene Anlage ist mit den Trennwärmetauschern des Gebäudekühlsystems verbunden.

Die Pumpe saugt das in der Wasseraufbereitungsanlage voll entsalzte Wasser an und fördert es gegen den Betriebsdruck in den Ausgleichsbehälter. Wenn der maximal zulässige Füllstand im Behälter erreicht ist, wird die Pumpe über ein Regelsystem abgeschaltet. Eine der Pumpe nachgeschaltete Rückschlagklappe verhindert den Rückfluß des Wassers in die Vorratsbehälter.

Bei einer Mediausdehnung infolge Temperaturerhöhung wird der Füllstand durch automatisches Öffnen eines motorgesteuerten Ventils korrigiert. Das überflüssige Medium strömt dann in den Pufferbehälter der Wasseraufbereitung zurück und kann wieder neu verwendet werden.

Das Druckniveau wird durch den Siededruck des Wassers im Ausgleichsbehälter über eine elektrische Widerstandsheizung eingestellt. Das Sicherheitsventil am Ausgleichsbehälter verhindert einen unerlaubt hohen Druckaufbau im Primärsystem.

6.2.3 AUSFALL EINES WÄRMEABNEHMERS

Die Wärmesenke, z.B. das Fernwärmenetz, kann durch äußere Umstände ausfallen. Da in diesem Fall nicht sofort die Notkühlung des Übergangslagers durch Naturkonvektion eingeleitet werden soll, sind auf dem Flachdach des Sekundärgebäudes Luftkühler angeordnet (Bild 6-3). Durch den Einsatz eines motorgetriebenen Lüfters kann das Bauvolumen der Kühler auf ein akzeptables Maß gesenkt werden.

Der beim Ausfall des Fernwärmenetzes im Sekundärkreis absinkende Strömungsdruckverlust an der Meßblende wird vom Steuersystem (Bild 6-3) erfaßt. Die motorgesteuerten Hauptventile zum Fernwärmenetz schließen, und die den Sekundärstrom fördernde Pumpe schaltet ab. Einer der zwei parallel angeordneten Pumpenstränge des Notkühlkreislaufes wird in Betrieb genommen. Die Motoren der extern angeordneten Luftkühler laufen an, und das ebenfalls motorgesteuerte Absperrventil, das im Normalbetrieb des Systems die Flutung der Außenkühler verhindert, öffnet sich. Der Notkühlkreislauf ist geschlossen.

Um im Winter Frostschäden an den Außenanlagen zu verhindern, sind die Außenkühler im Wartezustand mediumfrei. Das fehlende Kühlmedium wird bei Bedarf über ein nicht im Schaltplan eingezeichnetes Speisesystem zugeführt.

Nach der Benutzung der externen Kühlanlagen sind die Außenanlagen wieder in einen mediumfreien Zustand zu versetzen. Hierzu wird eine Druckgasbatterie eingeschaltet, die die Außenanlagen trocken bläst. Durch das geöffnete Abflußventil strömen das Druckgas und das restliche Medium in ein Abflußsystem.

6.3 THERMODYNAMISCHES VERHALTEN DES ÜBERGANGSLAGERS

Das Übergangslager ist, wie bereits dargestellt, mit einem Betriebskühlsystem und zwei voneinander unabhängigen Notkühlssystemen ausgerüstet. Im Normalbetrieb erfolgt die Nachwärmeabfuhr mit einer Zwangsumlauf-Wasserkühlung. Als erstes Notkühlsystem ist eine Naturkonvektions-Luftkühlung (Kap. 7.2.1) vorgesehen. Als weiteres Notkühlsystem steht eine Wasserberieselungsanlage (Kap. 7.2.2) zur Verfügung.

Im folgenden werden die Auslegungsdaten und das Betriebsverhalten des Übergangslagers im Normalbetrieb diskutiert. Hierbei wurde eine Leistung von 1100 kW (10% Sicherheitszuschlag) zugrundegelegt. Damit wird Unsicherheiten bei der Glasblockherstellung Rechnung getragen.

Die erforderlichen Temperaturberechnungen wurden mit den gekoppelten Programmen THERMIX, KONVEK und LOOPY (siehe Anhang B) durchgeführt. Mit dem Programm THERMIX wurden die Strukturtemperaturen ermittelt, mit dem Programm KONVEK die Naturkonvektionskühlung und mit dem Programm LOOPY die Kühlluftzu- und -abführung berechnet.

Die Kühlsysteme sind für eine Wärmefreisetzung von maximal 1100 kW ausgelegt. Die große installierte Wärmetauscherfläche führt im Normalbetrieb zu kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Primär- und Sekundärkühlkreis-

sen. Bei Ausfall einzelner Hilfsanlagen (Störfall) bietet sich damit die Möglichkeit, mit einem Kühlstrang und nur geringfügig erhöhter Primärwassertemperatur die gesamte anfallende Wärme abzuführen.

Eine schematische Darstellung des Betriebskühlsystems ist in Bild 6-5 wiedergegeben, wobei zur Verdeutlichung nur einer der drei Kühlkreise gezeichnet ist.

Bei einem frisch beladenen Übergangslager werden z.B. aus einem Fernwärmenetz 3,2 kg/s Wasser entnommen und von 40 auf 120 Grad C aufgeheizt. Hierbei wird das Wasser zuerst durch die zur Kühlung der Gebäudewand dienende Wärmetauschereinheit und anschließend durch die der eigentlichen Behälterkühlung dienende Einheit geführt. Den Hauptteil der Nachwärme führt zu Betriebsbeginn mit 750 kW die Behälterkühlung ab. Ein Anteil von 310 kW wird von der Strömungswandkühlung abgeführt. Die Wärmeverluste sind mit 40 kW nahezu unbedeutend.

Während der ersten 5 Betriebsjahre nimmt die Wärmeproduktion sehr schnell ab. Dieser Abfall verlangsamt sich in den darauffolgenden Jahren. Im einzelnen vermindert sie sich von 1100 kW bei Beladung auf

- 700 kW im 5. Betriebsjahr,
- 560 kW im 10. Betriebsjahr und
- 420 kW im 20. Betriebsjahr.

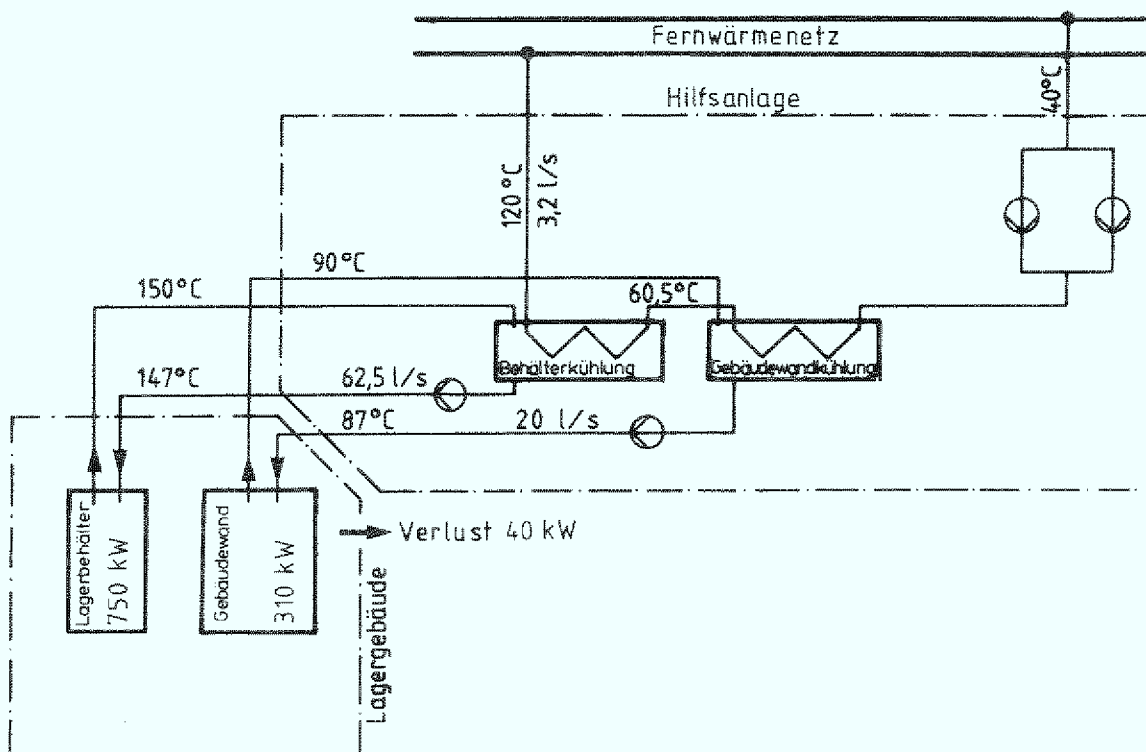


Bild 6-5: Schematische Darstellung des Betriebskühlsystems

Die Einspeisetemperatur ins Fernwärmenetz wird durch Verminderung des sekundärseitigen Massenstromes entsprechend dem fallenden Wärmeangebot auf 120 Grad C konstant gehalten. Zu Betriebsbeginn beträgt der Entnahmestrom 3,2 kg/s und sinkt mit fortschreitender Betriebszeit des Übergangslagers auf

- 2,00 kg/s im 5. Betriebsjahr,
- 1,50 kg/s im 10. Betriebsjahr und auf
- 1,20 kg/s im 20. Betriebsjahr.

Auf der Primärseite hingegen wird das Kühlwasser in allen Betriebszuständen mit einem konstanten Massenstrom von insgesamt 3,9 kg/s je Doppelrohrwärmetauscher und einer Temperatur von ca. 150 Grad C umgewälzt. Das gleiche trifft auf das Kühlsystem der Strömungsführung zu. Durch dieses Vorgehen verschiebt sich die mit den einzelnen Kühlsystemen gewinnbare Wärme entsprechend dem Wärmeangebot. Bild 6-6 verdeutlicht, daß die mit der Behälterkühlung entnommene Wärmemenge stark sinkt, während die in der Strömungsführung entnommene nahezu konstant bleibt.

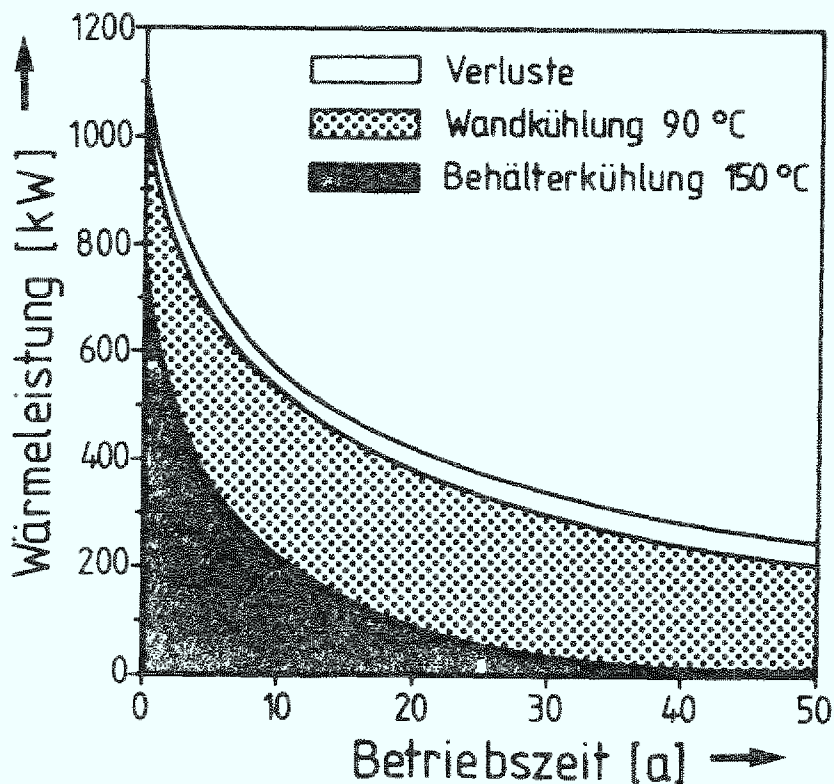


Bild 6-6: Verteilung der erzeugten Wärme auf die installierten Betriebskühlsysteme

Die mit einem Übergangslager gewinnbare Wärme ist in Bild 6-7a kumuliert über der Betriebszeit aufgetragen. Unter Berücksichtigung der Wärmeverluste (4-10%) können in den ersten

- 15 Betriebsjahren $2,9 \cdot 10^5$ GJ,
- 30 Betriebsjahren $4,6 \cdot 10^5$ GJ und in
- 50 Betriebsjahren $6,3 \cdot 10^5$ GJ

Wärme gewonnen werden. Dies entspricht einer jährlichen Heizöleinsparung (Bild 6-7b) von

- 760.000 l im 1. Betriebsjahr,
- 350.000 l im 15. Betriebsjahr,
- 250.000 l im 30. Betriebsjahr und
- 170.000 l im 50. Betriebsjahr.

Als wirtschaftlich sinnvoll erweist sich aus heutiger Sicht die Nachwärmenutzung nur in den beiden ersten Jahrzehnten des Betriebs (Bild 6-8).

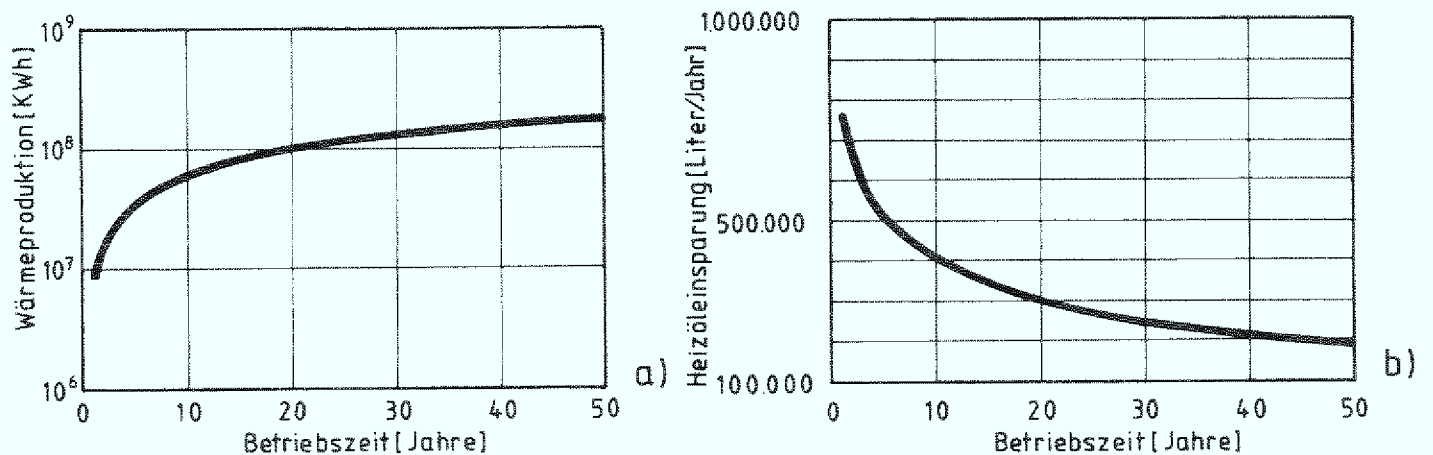


Bild 6-7: Über einen Betriebszeitraum von 50 Jahren gewinnbare Wärme
a) Insgesamt gewonnene Wärme
b) Mögliche jährliche Heizöleinsparung

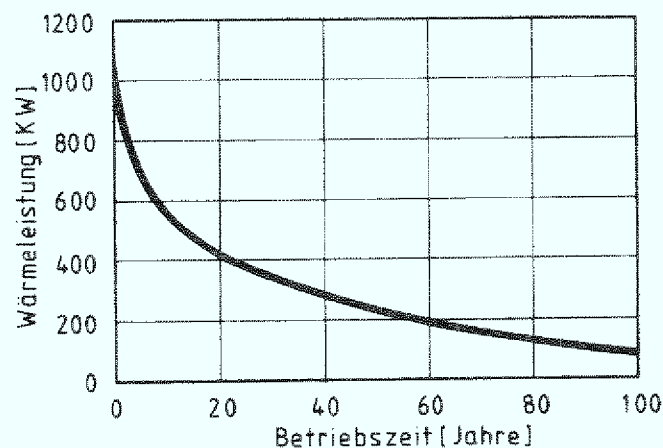


Bild 6-8: Abfall der Nachwärmeleistung in einem Übergangslager im Verlauf von 100 Jahren (Verglasung 7 Jahre nach Reaktorentnahme)

Nach der vollständigen Beladung eines Übergangslagers mit frischen Glasblöcken stellen sich bei Normalbetrieb die höchsten Temperaturen während der gesamten Betriebszeit ein (Bild 6-9). So treten zu diesem Zeitpunkt in der inneren Lagerschachtreihe Wandtemperaturen von 200 Grad C auf. Sie beeinflussen jedoch nur wenige Glasblöcke. Der überwiegende Teil der wärmeerzeugenden Elemente steht in Lagerschächten mit Wandtemperaturen zwischen 180 und 190 Grad C.

Die Maximaltemperatur der Glasblöcke wird durch die Wandtemperatur des Lagerschachtes, den Kannendurchmesser und die Wärmefreisetzung bestimmt.

Bezogen auf eine 200 Grad C heiße Lagerschachtwand stellt sich die in Bild 6-10 wiedergegebene Temperaturverteilung ein. Der Temperaturgradient zwischen Kanne und Lagerschachtwand beträgt 60 Grad C, bedingt durch die Wärmeübertragung durch Strahlung. Hinzu kommt eine weitere Temperaturerhöhung von 120 Grad C im Glas, so daß sich im Zentrum der Kokille eine Temperatur von 380 Grad C einstellt (Bild 6-10). Mit fortschreitender Abklingzeit der eingebetteten radioaktiven Stoffe fällt die Zentraltemperatur auf

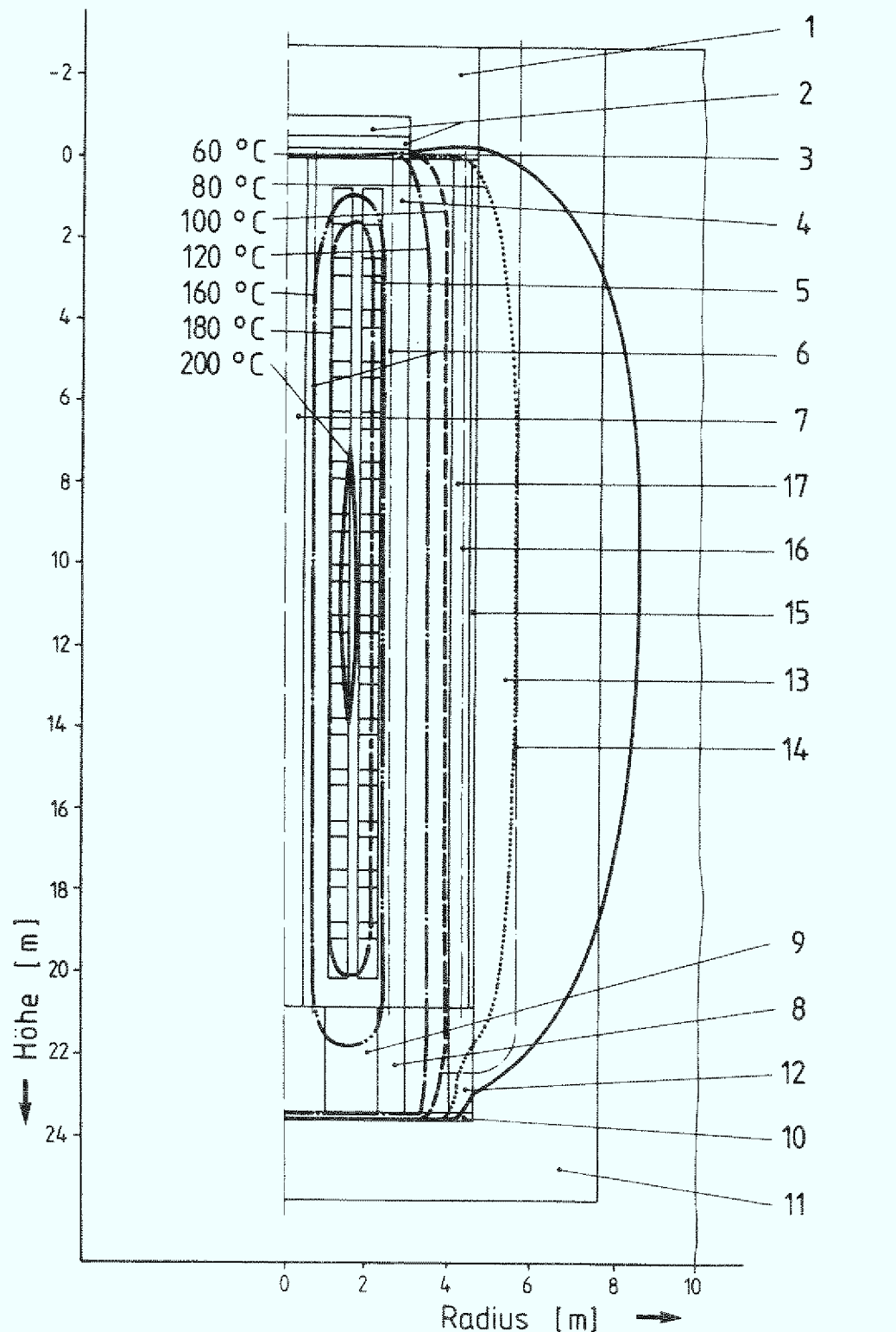
- 305 Grad C im 5. Betriebsjahr,
- 270 Grad C im 10. Betriebsjahr und
- 245 Grad C im 20. Betriebsjahr.

Diese Angaben setzen voraus, daß die Kokille maximal 2,25 kW Wärme freisetzt.

Auch bei Nichteinhaltung der Spezifikationen, z.B. Wärmefreisetzung der Kokille mit 20 W/dm³ statt 15 W/dm³, werden zulässige Temperaturgrenzwerte im Glas nicht überschritten. Die Maximaltemperatur bleibt bei frischer Beladung unterhalb der zulässigen Grenze von 450 Grad C (Bild 6-10). Neben den erreichten Glastemperaturen sind die Betontemperaturen am Schutzgebäude von besonderem Interesse, da wegen der Schutzfunktion die Festigkeitswerte des Betons über die gesamte Betriebszeit gewährleistet sein müssen. Nach der Beladung des Übergangslagers liegen die Temperaturen an der Gebäudeinnenseite zwischen 80 und 90 Grad C (Bild 6-9). Durch das niedrige Temperaturniveau sind keine nennenswerten Festigkeits-einbußen zu erwarten.

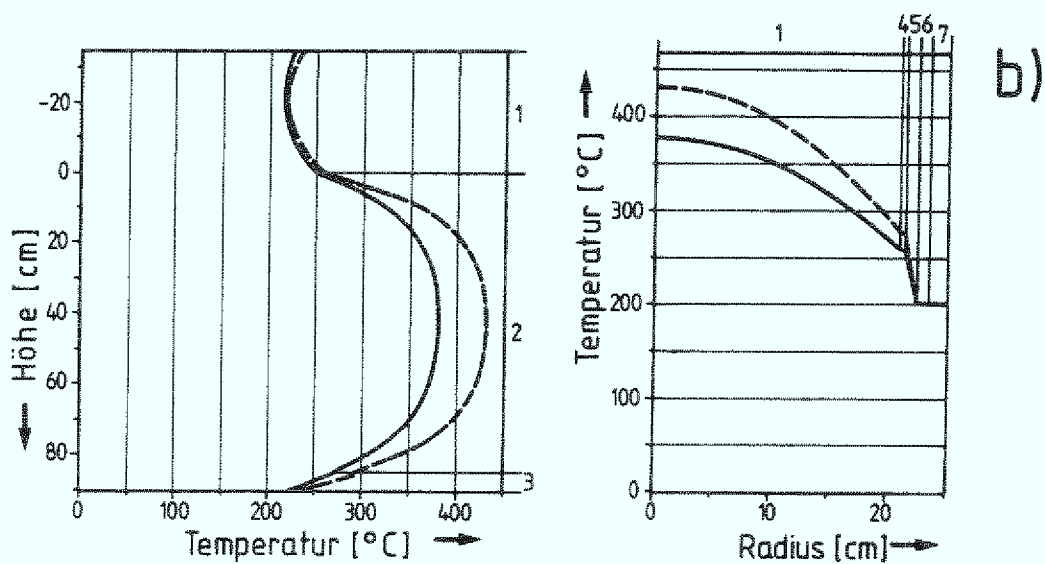
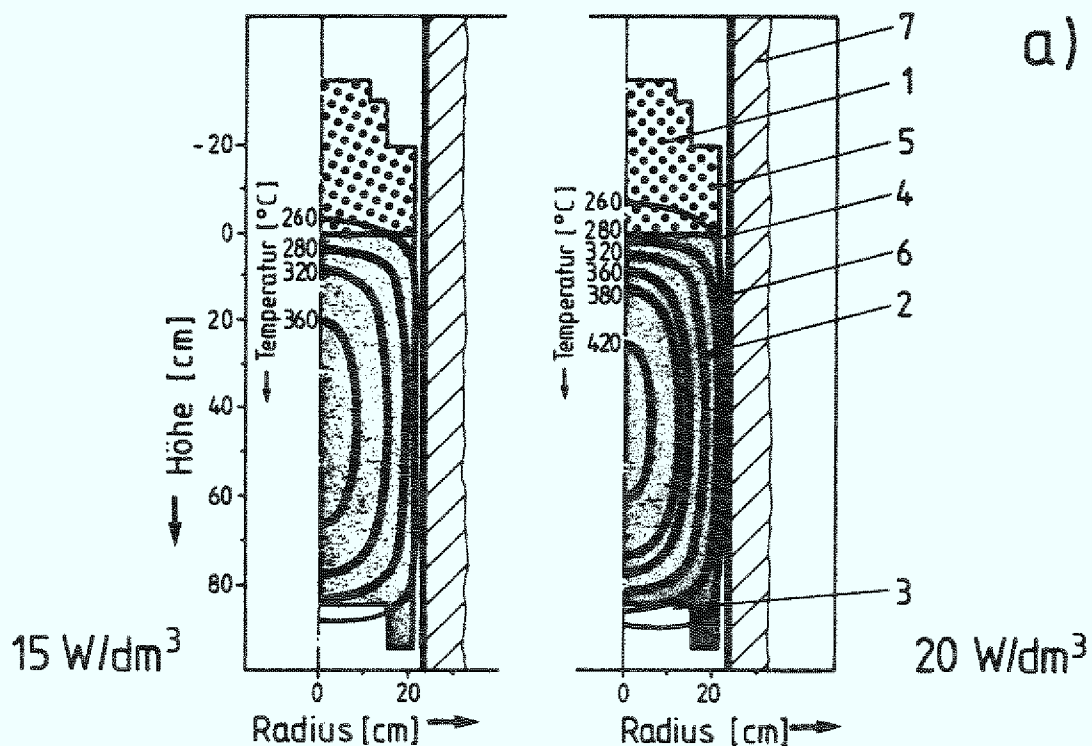
Bild 6-11 zeigt die sich mit der Betriebszeit ändernden Strukturtemperaturen anhand von axialen und radialen Temperaturschnitten durch die heißeste Lagerzone. Sie sind wesentlich geprägt durch die über der Betriebszeit konstant gehaltenen Kühlwassertemperaturen (150 Grad C im Behälter, 90 Grad C in der Strömungsführung).

Die axialen Temperaturprofile in Bild 6-11a zeigen, daß sich das Temperaturmaximum über eine Lagerhöhe von 13 m erstreckt und somit 10 der 15 Kannen erfaßt. Die radialen Temperaturprofile in Bild 6-11b zeigen aber auch, daß dieses Temperaturmaximum nicht ausgeprägt ist.



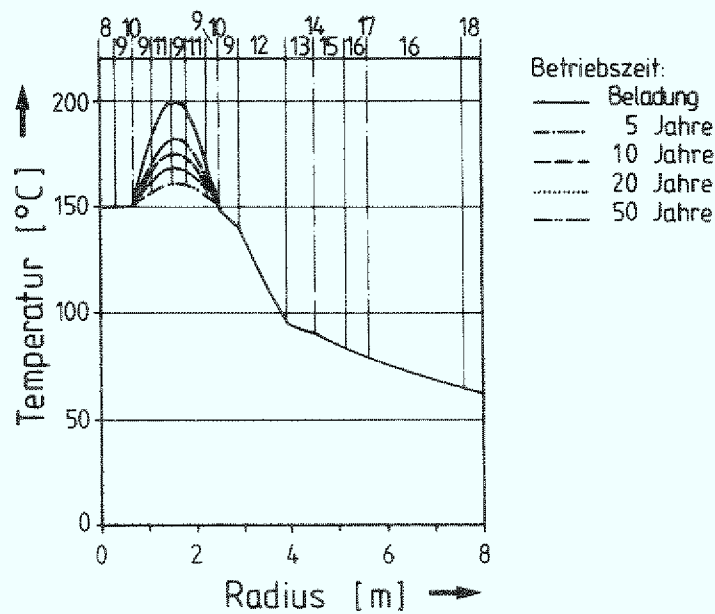
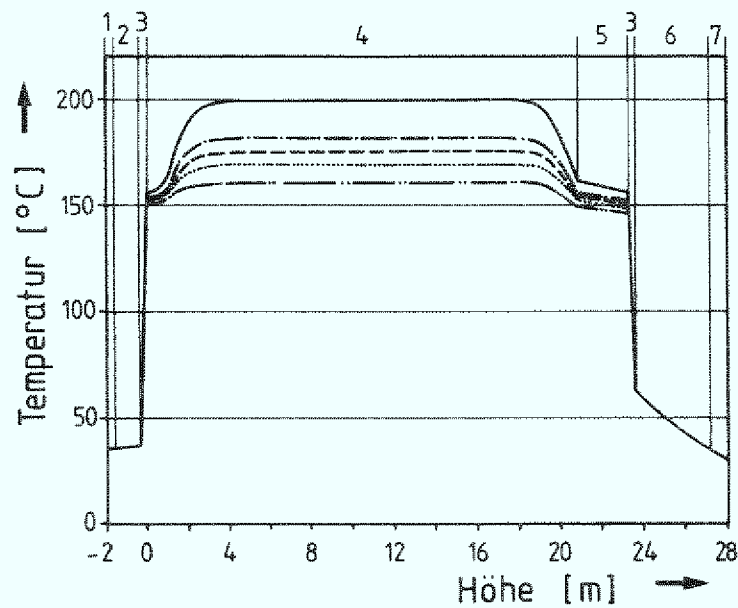
- | | |
|----------------------------|--|
| 1. BELADERAUM | 9. BEHÄLTERSTÜTZEN |
| 2. SCHUTZDECKEL | 10. ISOLATION |
| 3. ISOLATION (KAOWOOL) | 11. FUNDAMENTPLATTE |
| 4. LAGERBEHÄLTER | 12. AUFLAGER-STRÖMUNGSFÜHRUNG |
| 5. COGEMA-KOKILLE | 13. SCHUTZGEBÄUDEWAND |
| 6. BEHÄLTERKÜHLUNG (150°C) | 14. KÜHLLUFT-ZUFÜHRUNG FÜR NATURZUGKÜHLUNG |
| 7. GG-KUGELSCHÜTTUNG | 15. LUFTSPALT |
| 8. FUNDAMENTRAUM | 16. KÜHLUNG DER STRÖMUNGSFÜHRUNG (90°C) |
| | 17. STRÖMUNGSFÜHRUNG |

Bild 6-9: Temperaturverteilung im Übergangslager unter normalen Betriebsbedingungen (1100 kW Wärmeabgabe, $T(\text{Behälterkühlung}) = 150 \text{ Grad C}$, $T(\text{Wandkühlung}) = 90 \text{ Grad C}$)



- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| 1. GASPLENUM | 5. SPALT IM LAGERSCHACHT |
| 2. BOROSILIKATGLAS | 6. SCHACHTLINER |
| 3. SPALT ZUR UNTEREN KOKILLE | 7. LAGERBEHÄLTER |
| 4. EDELSTAHLKOKILLE | |

Bild 6-10: Temperaturverteilung in einer COGEMA-Kanne nach Einlagerung in ein Übergangslager, bezogen auf eine Lagerschachttemperatur von 200 Grad C (— 15 W/l, - - - - - 20 W/l)



- | | |
|----------------------------|--|
| 1. BELADERAUM | 10. BEHÄLTERKÜHLUNG (150°C) |
| 2. SCHUTZDECKEL | 11. POSITION DER KOKILLEN |
| 3. ISOLATION | 12. KÜHLLUFTKANAL |
| 4. HEISSESTER LAGERSCHACHT | 13. LUFTFÜHRUNGSWAND |
| 5. FUNDAMENTRAUM | 14. KÜHLUNG LUFTFÜHRUNG (90°C) |
| 6. FUNDAMENTPLATTE | 15. LUFTSPALT |
| 7. ERDREICH | 16. GEBÄUDEWAND |
| 8. KUGELSCHÜTTUNG | 17. POSITION: LUFTZUFUHR NATURZUGKÜHLUNG |
| 9. LAGERBEHÄLTER | 18. UMGEBUNG |

Bild 6-11: Temperaturprofile durch die heißeste Zone eines frisch beladenen Übergangslagers als Funktion der Betriebszeit

7. SICHERHEITSTECHNISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die bei der Konzipierung des Übergangslagers zu berücksichtigenden Gesetze, Verordnungen und Vorschriften führen zu konstruktiven, kontrollierenden und administrativen Maßnahmen.

Nach dem Atomgesetz unterliegen die Errichtung und der Betrieb von Nuklearlagern (z.B. Zwischen- und Sicherstellungslager) dem Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und dem Schutz gegen ihre Gefahren. Es sind unter anderem folgende Gesetze zu berücksichtigen:

§ 1 Atomgesetz:

Es fordert den Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgütern vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen.

§ 9 Atomgesetz:

Zur Errichtung des Lagers ist ein Planfeststellungsverfahren notwendig. Es ist Sache der Betreiber, für ihre abgebrannten Brennelemente selbst Sorge zu tragen. Aufgabe der Bundesländer ist es, die Abfälle zwischenzulagern. Der Bund hat die Aufgabe, Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zu erstellen.

§ 28 Strahlenschutzverordnung:

Es ist jede Strahlenexposition oder Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls, auch unterhalb der in der Verordnung festgesetzten Grenzwerte, so gering wie möglich zu halten. Es werden Grenzwerte für die Strahlenbelastung der Bevölkerung beim Auftreten des ungünstigsten Störfalles festgelegt.

§ 45 Strahlenschutzverordnung:

In der Umgebung kerntechnischer Anlagen darf die jährliche Strahlenbelastung, bei bestimmungsgemäßem Betrieb, 0,3 mJ/kg (30 mrem) für den Ganzkörper nicht überschreiten.

§ 46 Strahlenschutzverordnung:

Hierin werden die der Strahlung zugrundeliegenden freisetzbaren Aktivitätskonzentrationen für Luft, Wasser und Boden festgelegt.

§ 49 und § 50 Strahlenschutzverordnung:

Diese Gesetze legen u.a. die maximale jährliche Strahlenbelastung für das Betriebspersonal fest. Bei Störfällen sind größere Strahlenexpositionen (pro Jahr das Zweifache des Grenzwertes) erlaubt.

§ 54 Strahlenschutzverordnung:

Hierin wird der Schutz (Abschirmungen) strahlenexponierter Personen gefordert.

Daraus ergeben sich für das Übergangslager folgende Schutzziele:

- Schutz des Personals und der Umgebung vor direkter Strahlung,
- sicherer Aktivitätseinschluß,
- sichere Wärmeabfuhr,
- Auslegung der Anlage gegen Störfälle.

7.1 GEFÄHRDUNG DES ÜBERGANGSLAGERS DURCH EINWIRKUNGEN VON INNEN UND AUßEN

Geht man davon aus, daß die Sicherheit des Übergangslagers gegen anlageninterne Störfälle auf der Funktionsfähigkeit einer großen Anzahl redundanter und diversitärer Sicherheitseinrichtungen beruht, werden die äußeren Einwirkungen und die unkontrollierten inneren Einwirkungen in ihren Eigenschaften als "common mode failures" zu einem Problem.

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung aller möglichen Ereignisse, bei deren Eintreffen die sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen

- das Lager muß langfristig im sicheren Zustand verbleiben,
- die Wärme muß sicher abgeführt werden,
- das Lagergut darf sich nicht unzulässig erwärmen,
- die Strahlenbelastung des Personals darf die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten und
- es darf zu keiner Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung kommen,

weiterhin gewährleistet sein müssen.

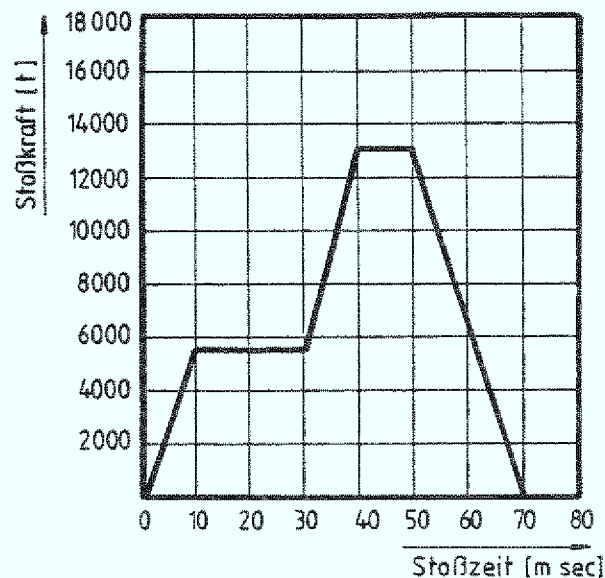
7.1.1 EINWIRKUNGEN VON AUßEN

In Anlehnung an die vom Bundesministerium herausgegebene Aufstellung können folgende Ereignisse aufgeführt werden:

- Flugzeugabsturz
Es hat sich als notwendig erwiesen, den Absturz eines Phantom Kampfflugzeuges zu unterstellen, und zwar mit einer Gesamtmasse von 20 t und einer Geschwindigkeit von 215 m/s.

Bei einem Flugzeugabsturz muß mit einem anschließenden Kerosinbrand (1200 Grad C) gerechnet werden. Der Absturz ist abgesehen von Folgeerscheinungen (Brand, Trümmerwirkung usw.) ein lokales Ereignis. Das Schutzziel kann einmal durch räumliche Trennung sicherheitstechnisch bedeutsamer Komponenten und zum zweiten durch baulichen Schutz erreicht werden. In den Richtlinien der Reaktorsicherheitskommission (RSK) und im Entwurf 2202 der Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) sind für einen Flugzeugabsturz folgende Lastannahmen unterstellt:

– Stoßlast-Zeit-Diagramm



- Auftrefffläche
Die Auftrefffläche ist mit einem Durchmesser von 3 m (7 m^2) anzunehmen.
- Auftreffwinkel
Der Auftreffwinkel ist als normal auf die Tangentialebene im Auftreffpunkt vorgegeben.

• Erdbeben

Erdbeben sind natürliche Erschütterungen der Erdkruste, deren Wirkungen und Stärke mit Hilfe verschiedener Skalen beschrieben werden. Herdgeschehen und Ausbreitungsmechanismen der Erschütterungen hängen von den seismotektonischen und den geophysikalischen Verhältnissen des jeweiligen Standortes ab.

Durch die seismischen Anregungen werden die Gebäudestrukturen sowie die Einbauten des Übergangslagers erschüttert. Die zahlenmäßige Erfassung der möglichen Reaktionen der Gebäude und der Einbauten setzt voraus, daß die Systemparameter wie z.B. Massenträgheiten, Materialverhalten, aber auch das dynamische Verhalten des Bauuntergrundes bekannt sind.

Um zu gewährleisten, daß in der BRD durch Kernkraftwerke in seismisch aktiven Gebieten keine größere Gefährdung entstehen kann als in seismisch nicht aktiven Gebieten, wurden Auslegungsregeln eingeführt, die sinngemäß auch auf ein Übergangslager übertragen werden können. Es werden zwei Arten von Bemessungserdbeben zugrundegelegt, die sich in ihrer Intensität, d.h. in ihrem Maß für mögliche lokale Zerstörungen, unterscheiden:

- das Auslegungserdbeben (nach KTA 2201, Teil 1)
Dies ist ein Erdbeben mit der für den Standort größten Intensität (Maß für seine Auswirkungen auf den Menschen, auf Bauwerke und auf

auf Bauwerke und auf die Erdoberfläche), das unter Berücksichtigung einer näheren Umgebung des Standortes (in derselben seismotechnischen Einheit bis etwa 50 km Entfernung vom Standort) in der Vergangenheit aufgetreten ist. In der Tabelle 7-1 ist die Beschleunigung für die verschiedenen Erdbebenzonen aufgetragen.

Erdbebenzone	max. Horizontalbeschleunigung Auslegungserdbeben $a(\max)$ (m/s^2)
0	0
1	0,3 - 0,9
2	0,7 - 2,2
3	1,5 - 3,0

Tab.7-1: Beschleunigungen in den verschiedenen Erdbebenzonen

- das Sicherheitserdbeben (nach KTA 2201, Teil 1)
Das Sicherheitserdbeben ist das Erdbeben mit der für den Standort größten Intensität, das unter Berücksichtigung einer größeren Umgebung des Standortes (bis etwa 200 km vom Standort) nach wissenschaftlichen Erkenntnissen auftreten kann. Es muß eine maximale Horizontalbeschleunigung von mindestens $0,5 \text{ m/s}^2$ angenommen werden.

Die Vertikalbeschleunigung beträgt gemäß seismologischen Gutachten 50 % der Horizontalbeschleunigung.

Im Falle des Auslegungserdbebens muß im allgemeinen der Weiterbetrieb der Anlage gewährleistet sein. Nach einem Sicherheitsbeben müssen die für die Anlagensicherheit bedeutsamen Systeme noch intakt und verfügbar sein.

- Druckwellen

Die Beanspruchung von kerntechnischen Anlagen durch Druckwellen kann durch eine Explosion zündfähiger Gaswolken hervorgerufen werden (vgl. Kap. 3.1.3.4). Als Ursache für die Entstehung zündfähiger Gaswolken sind Unfälle bei dem Transport, der Handhabung und/oder der Lagerung explosiver Stoffe, insbesondere von Flüssiggasen, zu erwähnen. In den Richtlinien des Bundesministeriums des Inneren vom 13.09.1976 ist die Lastannahme für Druckwellen aus chemischen Explosionen festgelegt. Im einzelnen sind dies:

- der Druck in der ankommenden Welle $1,3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- der Reflexionsdruck $1,45 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- der zeitliche Verlauf
 - Druckanstieg auf Spitzendruck 0,1 s
 - Dauer des impulswirksamen Drucks 0,2 s
- die allseitige quasistatische Belastung $1,3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Bei der Zündung explosibler Gemische sind folgende Schadenswirkungen möglich:

- Mechanische Wirkungen auf die Gebäude durch Stöße, wobei bei kurzen Stößen der Impuls und bei langandauernden Stößen der Spitzendruck maßgebend sind. Die mechanischen Wirkungen sind nur bei Detonation von Bedeutung.
- Hitzewirkungen, es erfolgt kein langandauernder Brand.

Da es nicht möglich erscheint, eine Explosion im Lagergebäude -bei Naturkonvektion- auszuschließen und die Auswirkungen zu beherrschen, gilt es, das Ansaugen explosibler Gemische zu verhindern.

Hierzu können folgende Maßnahmen dienen:

- das Einhalten von Sicherheitsabständen,
- das Umleiten und Verdünnen der Gaswolken und
- das Zünden der Gaswolken vor Eintritt in den Lagerbereich

Die im folgenden aufgeführten möglichen Einwirkungen von außen lassen sich durch konstruktive Maßnahmen beherrschen:

- Flächenbrand,
- Hochwasser,
- Blitzschlag,
- Wind-, Schnee-, und Eislasten (DIN 1055) und
- Einwirkungen biologischer Organismen.

7.1.1.1 Verhalten des Übergangslagers bei den Lastfällen Flugzeugabsturz und Erdbeben

Die Auswirkungen auf das Übergangslager, die infolge der äußeren Einwirkungen Flugzeugabsturz und Erdbeben auftreten können, wurden in /7-1/ untersucht.

Zur Beurteilung der auftretenden Lasten, im Falle eines Flugzeugabsturzes bzw. durch das Auftreten eines Erdbebens, ist es notwendig, dynamische Untersuchungen durchzuführen, die die Beanspruchung auf die sicherheitstechnischen Einrichtungen und relevanten Gebäude ausweisen. Dabei stellen die beiden angesprochenen Einwirkungen von außen zwei grundsätzlich verschiedene Belastungsfälle dar. Beim Flugzeugabsturz handelt es sich um eine deterministische Belastung, die nur über Bruchteile von Sekunden wirkt. Demgegenüber ist das Erdbeben eine stochastische Belastung, die mehrere Sekunden andauert.

Da man die dynamische Untersuchung nicht im gleichen Maße in eine Reihe von Einzelberechnungen für Gebäudeteile zerlegen kann, wie z.B. bei statischen Aufgaben und eine detaillierte Erfassung aller Einzelbauteile in der Berechnung zu einem erheblichen Berechnungsaufwand führen würde, kommt der Abbildung einer Anlage auf ein berechnungsfähiges System als Modell für die dynamische Berechnung erhöhte Bedeutung zu.

Bei der Behandlung des Problems müssen die einzelnen relevanten Strukturen in mehreren Abwicklungsstufen durch geeignete vereinfachte Strukturmodelle ersetzt werden. Die seismische Anregung bzw. die dynamische Belastung haben auf die einzelne Komponente einer Anlage die Wirkung einer Fremderregung, die von den Eigenschaften einer ganzen Reihe vorgeschalteter dynamischer Strukturelemente abhängt.

Somit ist das Gesamtsystem eines Gebäudes einschließlich großer Anlagenteile für das Schwingungsverhalten und damit für die resultierenden Beanspruchungen von Bedeutung. Zudem beeinflussen sich Boden und Bauwerk gegenseitig, was ganz besonders für das hier betrachtete Übergangslager zutrifft, da es zu zwei Dritteln unterhalb der Erdoberfläche angeordnet ist.

Um das Schwingungsverhalten des gesamten Übergangslagers wiederzugeben, wurde ein Gebäudemodell mit relativ wenigen Freiheitsgraden gewählt. Das entwickelte Modell besteht aus Balkenelementen, die die Abbildung von Hohlquerschnitten zulassen und Schub und Biegung berücksichtigen.

In Bild 7-1 ist das Übergangslager schematisch dargestellt und den einzelnen Balkenelementen des Ersatzsystems zugeordnet. Gleichartige Teilstrukturen sind in Elementgruppen zusammengefaßt. Das Modell besteht aus zwei Unterstrukturen, wobei Stahlgußbehälter-, Behälterstützen- und Fundamentelemente in Struktur 1 und Betongebäudeelemente in Struktur 2 zusammengefaßt sind. Das Betongebäude und der auf dem Behälterauflager stehende Stahlgußbehälter sind über das Fundament miteinander gekoppelt.

Die Länge der Elemente des Lagerbehälters entspricht der Dicke der jeweiligen Zwischenscheiben. Die Balkenelementunterteilung des Betongebäudes wird durch die unterbrochenen Linien in Bild 7-1 angedeutet.

Die Verschiebungs- und Beschleunigungsverläufe wurden für die einzelnen Knotenpunkte des Übergangslagers mit und ohne Bodenmodell berechnet. Beim Gebäude-Bodenmodell wurde der Schubmodul des Bodens zwischen $G = 280, 355$ und 430 MN/m^2 variiert. Die Verschiebungszeitverläufe zeigen deutlich, daß die Verschiebungen mit zunehmender Bodensteifigkeit abnehmen.

In x-Richtung, die die Hauptrichtung des zeitabhängigen Erdbebenverschiebungsvektors darstellt, liegt die max. Verschiebung bei 36,6 mm. Eine Variation des Schubmoduls um $\pm 20\%$ ergibt eine Änderung der absoluten Verschiebung um ca. $\pm 6\%$ (Gebäudeoberkante).

In y-Richtung (hier liegt die max. Verschiebung bei 14,4 mm) ist die Maximalverschiebung in Abhängigkeit des Schubmoduls nahezu konstant, sie zeigt für die "realen" Moduli sogar einen umgekehrten Trend. Die Relativbewegung zwischen Gebäudeoberkante und Erdbebenverlauf nimmt mit steigendem Schubmodul wieder ab.

Die Zeitverläufe von Behälteroberkante und dem Gebäudepunkt auf gleicher Höhe zeigen keine wesentlichen Relativbewegungen auf ($\leq 1 \text{ mm}$). Nach den Berechnungen mit den verwendeten Modellen ist für den Lastfall Erdbeben nicht mit einem Zusammenstoß zwischen Behälter und Strömungswand zu rechnen.

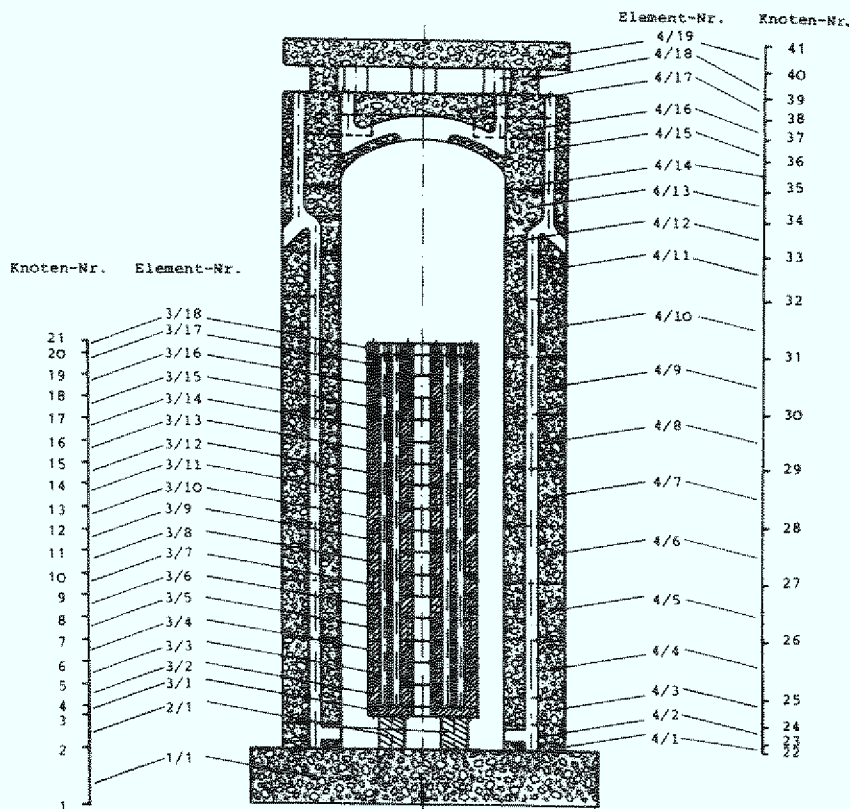


Bild 7-1: Schnittschema des Übergangslagers mit Kennzeichnung der Elemente und Knotenpunkte in einem Balkenmodell /7-1/

Die Maximalbeschleunigungen treten in der Hauptrichtung des Erdbebens auf (x-Richtung). Die Beschleunigungen nehmen mit ansteigendem Schermodul des Bodens zu. Für die x-Richtung zeigt sich für den niedrigsten Schubmodul des Bodens (280 MN/m^2) eine Zunahme der Maximalbeschleunigungen am Stahlgußbehälter von unten nach oben. Mit Erhöhung des Schubmoduls (355 bzw. 430 MN/m^2) steigen die Beschleunigungen unterschiedlich stark an. Die Maximalbeschleunigung an der Behälterunterkante liegt höher als an der Behälteroberkante.

Die größten Beanspruchungen treten für das Übergangslager an der Anbindung Stahlgußbehälter/Fundament (d.h. im Bereich der Behälterstützen des Übergangslagermodells) und am Betongebäude (Übergang Fundament/zylindrische Betonwand) auf. Die Maximalbeanspruchungen, die in den angesprochenen Querschnitten auftreten, betragen bei einem Schubmodul des Bodens von 355 MN/m^2 :

• Stahlgußbehälter/Fundament (Stützen)	
Zugspannung	$10,30 \text{ N/mm}^2$
Druckspannung	$- 10,52 \text{ N/mm}^2$
Schubspannung	$3,06 \text{ N/mm}^2$
Vergleichsspannung	$10,68 \text{ N/mm}^2$

• Fundament/Betongebäude	
Normalkraft	- 18,67 MN
Querkraft	381,24 MN
Biegemoment	566,86 MNm

Eine Torsionsbelastung tritt nicht auf.

Die Spannungen steigen mit Zunahme des Schubmoduls im Boden an. Für das Modell ohne Bodenbalken liegen die Spannungen, mit Ausnahme der Schubspannungen, erheblich höher.

Die Belastungen an den Behälterstützen lassen Aussagen über die Kraft zu, die (z.B. durch Seile) aufgenommen werden muß, um eine sichere Anbindung des Behälters zu gewährleisten. Die Berechnungen gehen dabei von einer vollständigen Kraftübertragung vom Stahlgußbehälter zum Fundament aus. Nach den Berechnungen mit dem Bodenmodell ergibt sich diese Seilkraft $F(\text{Seil}) = S(v) / A$, $A = 6,4 \text{ m}^2$ zu:

$F(\text{Seil}) = 2,3 \text{ MN}$	mit Bodenmodell ($G = 430 \text{ MN/m}^2$)
$F(\text{Seil}) = 17,4 \text{ MN}$	ohne Bodenmodell

Die auftretenden Maximalspannungen liegen hier mit einem Sicherheitsbeiwert ($S = \sigma(0,2) / \sigma(v)$) von:

$S = 13,2$	mit Bodenmodell ($G = 430 \text{ MN/m}^2$)
$S = 1,75$	ohne Bodenmodell

unter der 0,2-Dehngrenze für warmfesten Stahlguß GS-C 25 ($\sigma(0,2) = 195 \text{ N/mm}^2$ bei einer Temperatur von 200 Grad C).

Die Belastungen am Übergang Fundamentplatte-Zylinderwand sind für ein eventuelles Versagen des Betongebäudes maßgebend. Als Bemessungsgrundlage ergibt sich für Bn 550 der Wert $\beta(R) = 49,5 \text{ N/mm}^2$ für die zulässige Druckbeanspruchung des Betons. Der Sicherheitsbeiwert ($S = \beta(R) / \sigma(\text{Druck})$) gegenüber der zulässigen Druckspannung ist:

$S = 18,7$	mit Bodenmodell ($G = 430 \text{ MN/m}^2$)
$S = 2,9$	ohne Bodenmodell

Die maximale Zugspannung $\sigma(\text{Zug}) = 62,51 \text{ N/mm}^2$, die sich in der Berechnung ohne Bodenmodell ergibt, liegt unter der zulässigen Zugspannung des Betonstahls BSt 550 ($\sigma(\text{zul}) = 500 \text{ N/mm}^2$). Die maximalen Schubspannungen liegen unter der zulässigen Spannung $\tau(\text{zul}) = 9 \text{ N/mm}^2$ bei voller Schubdeckung.

Die Lastannahmen des Flugzeugabsturzes werden auf das für die Erdbebenanalyse erstellte Balkenmodell mit und ohne Bodenmodell angewandt. Für die Zeitverläufe wurden die gleichen Strukturpunkte wie bei der Erdbebenberechnung gewählt. Gegenüber dem Erdbebenlastfall bestehen zwei grundlegende Unterschiede. Die Erregungsfunktion ist nur über einen Bruchteil des Beanspruchungszeitraumes wirksam. Daher sind die Antwortzeitverläufe nicht wie in der Erdbebenanregung durch die Verschiebungsverläufe geprägt.

Die Relativverschiebungen an Gebäude und Behälter ergeben sich als Differenz aus Maximalverschiebung, die gleich der Verschiebung an Gebäude- bzw. Behälteroberkante ist, und dem zugehörigen Wert an der Fundament-

oberkante bzw. Behälterunterkante. Sowohl Relativ- als auch Maximalverschiebung nehmen mit zunehmendem Schubmodul des Bodens ab. Bei den Gebäude-Bodenmodellen bewirkt eine Variation des Schubmoduls um $\pm 20\%$ eine Erhöhung bzw. Absenkung der Relativverschiebung am Gebäude um $+18\%$ bzw. -8% . Die Relativverschiebung am Behälter verändert sich um ca. $\pm 5\%$. Die Relativverschiebung zwischen Behälteroberkante und Gebäude liegt bei ca. $25 \text{ mm} \pm 5,5\%$. Obwohl die Relativverschiebung wesentlich größer ist als beim Erdbebenlastfall, ist ein Zusammenprall der Behälteroberkante mit der Strömungswand (50 mm Abstand) im Lastfall Flugzeugabsturz nicht zu erwarten. Die Verschiebungen, die am Gebäudemodell (ohne Bodenbalken) vorliegen, sind wesentlich geringer. Die maximale Verschiebung wurde an der Gebäudeoberkante mit 73,5 mm für einen Schubmodul von 280 MN/m^2 errechnet. Aufgrund der durchgeführten Berechnungen ist ein Umkippen des Übergangslagers auszuschließen.

Bei den Modellen mit Bodenbalken tritt kaum ein Unterschied in der Maximalbeschleunigung auf. Für den starren Lastfall, d.h. eine Festsetzung des Fundaments, liegt ein deutlich geändertes Verhalten vor. Die Maximalbeschleunigung an der Gebäudeoberkante liegt höher und die Beschleunigungen am Behälter wesentlich niedriger als bei den Modellen mit Bodenbalken.

Damit ergibt die hier untersuchte Variation der Bodenkennwerte beim Gebäude-Bodenmodell keinen wesentlichen Einfluß auf das Beschleunigungsverhalten des Übergangslagers. Ein stark verändertes Verhalten stellt sich jedoch bei Vernachlässigung der Einbettung im Baugrund ein.

Entsprechend dem Lastfall Erdbeben werden für den Lastfall Flugzeugabsturz ebenfalls die Behälterstützen und der Übergang vom Fundament zur zylindrischen Gebäudewand untersucht. Die Berechnungen mit Bodenmodell zeigen bei Variation des Schubmoduls um $\pm 20\%$ eine maximale Abweichung von 2 % auf.

Für das Modell ohne Bodenbalken nimmt die Belastung der Behälterstützen im Vergleich zur Rechnung mit Bodenmodell ab, für das Betongebäude nimmt sie zu. Normalkräfte und Torsionsbelastung treten aufgrund der getroffenen Lastannahmen nicht auf.

Die aufzunehmende Seilkraft ($F(\text{Seil}) = \sigma(v) / A$, $A = 6,4 \text{ m}^2$) für die Anbindung des Stahlgußbehälters ergibt:

$$\begin{array}{ll} F(\text{Seil}) = 19,3 \text{ MN} & \text{mit Bodenmodell} \\ F(\text{Seil}) = 8,5 \text{ MN} & \text{ohne Bodenmodell} \end{array}$$

Die durch den Lastfall Flugzeugabsturz auftretenden Maximalspannungen liegen in den Behälterstützen mit folgendem Sicherheitsabstand unter der 0,2-Dehngrenze:

$$\begin{array}{ll} S = 1,6 & \text{mit Bodenmodell} \\ S = 3,6 & \text{ohne Bodenmodell} \end{array}$$

In der Betonwand ist das Verhältnis der zulässigen Druckbeanspruchung zur auftretenden Vergleichsspannung ($S = \beta(R) / \sigma(v)$):

$$\begin{array}{ll} S = 7,9 & \text{mit Bodenmodell} \\ S = 2,9 & \text{ohne Bodenmodell} \end{array}$$

Die maximalen Schubspannungen liegen unter der zulässigen Spannung $\tau(\text{zul}) = 5 \text{ N/mm}^2$ für verminderte Schubdeckung nach.

7.1.1.2 Zündbereiche auftretender Gasgemische

Für die Beurteilung der Explosionsgefahr, bzw. für die Auslegung der Sicherheitseinrichtungen, ist es notwendig, die unteren Zündgrenzen der in Frage kommenden gasförmigen Stoffe zu kennen. Die Werte können insbesondere dazu dienen, Grenzwerte für evtl. zu installierende Gaswarnanlagen festzulegen. Die Anlagen sollen beim Überschreiten der Grenzwerte Alarm auslösen bzw. Schutzmaßnahmen einleiten.

Es ist wichtig zu wissen, ob sich Gase beim Ausströmen in die Luft selbst entzünden bzw. welches Temperatur/Druckverhältnis, Luft/Gasgemisch usw. vorliegen muß, damit es zu einer Selbstentzündung des Gases kommen kann.

Für die hier beschriebenen Lagerkonzepte kann angenommen werden, daß die Anlage sich weit entfernt von chemischen Anlagen befindet und somit die Gefahr einer Selbstentzündung gering ist. Allerdings ist es möglich, daß durch die Wahl des Standortes die Möglichkeit eines Verkehrsunfalles unter Beteiligung eines Tankfahrzeuges nicht ausgeschlossen werden kann. Dabei ist es notwendig, die Anlage gegen Auswirkungen dieser Explosionen zu schützen.

In der folgenden Aufstellung werden einige Zündgemische (Luft/Brenngas-verhältnis) aufgezeigt, die durch eine Zündquelle zur Explosion gebracht werden können.

Brenngas	Zündbereich in Luft [Vol. %]	Zündtemperatur [Grad C]
Wasserstoff	4,1 - 75,6	560
Ammoniate	15,0 - 30,2	651
Methan	5,0 - 15,0	540
Äthan	3,0 - 15,5	515
Athylen	2,7 - 34,0	425
Acethylen	2,4 - 83,0	335
Propan	2,1 - 9,5	450
Isobuten	1,6 - 85,0	465
Vinychlorid	3,8 - 31,0	472
Benzin	0,6 - 8,0	300

Tab. 7-1: Zündbereiche und Zündtemperaturen technischer Gase /7-2/

7.1.2 EINWIRKUNGEN VON INNEN

In Anlehnung an die vom Bundesministerium des Inneren aufgestellte Merkpostenliste können folgende Ereignisse aufgeführt werden:

- mechanische Einwirkungen,
- Explosion,
- Brand,
- Wasser,
- Absturz eines Glasblocks,
- Absturz schwerer Lasten und der
- Ausfall von Komponenten und Systemen aus bisher nicht genannten Ursachen.

Durch konstruktive und administrative Maßnahmen ist eine Beschädigung des Lagergutes und der Wärmeabfuhrsysteme auszuschließen.

Die Kannen sind so auszulegen, daß sie einen Sturz aus 20 m Höhe ohne Beschädigung des Stahlzylinders überstehen. Die für die Handhabung notwendigen Hebezeuge sind so zu gestalten, daß ein frühzeitiges Lösen oder ein durch Fehlbedienung verursachter Absturz im Rahmen der bestehenden Sicherheitsbestimmungen nahezu ausgeschlossen werden kann. Für die Auslegung der Hebewerkzeuge ist die KTA-Regel 3902 anzuwenden.

7.2 WÄRMEABFUHRSTÖRFÄLLE

7.2.1 KÜHLUNG DES ÜBERGANGSLAGERS DURCH NATURKONVEKTION NACH VOLLSTÄNDIGEM AUSFALL DER BETRIEBSKÜHLUNG

Falls das mehrfach redundante betriebliche Wärmeabfuhrsystem versagt, wird ein inhärent sicheres Luftkühlssystem eingesetzt. Das Konzept der inhärent sicheren Kühlung beruht auf zwei physikalischen Phänomenen:

- Der Wärmeübergang an ein gasförmiges Medium von einer heißen Oberfläche ist umso intensiver, je größer die Geschwindigkeit ist, mit der das Gas an der Oberfläche vorbeiströmt.
- Heiße Luft erfährt gegenüber kalter Umgebungsluft eine Auftriebskraft (Differenz der statischen Drücke), sie strömt aufwärts.

Treten beide physikalischen Vorgänge gemeinsam auf, so spricht man von freier Konvektion.

Durch mehrere große Einströmöffnungen tritt Umgebungsluft ins Gebäude ein (vgl. Bild 4-1 und 4-2a). Diese Öffnungen sind aus Objektschutzgründen ca. 12 m über dem Erdboden angeordnet und führen die eintretende kalte Luft durch die Zuluftschächte in der Betonumschließung zum Boden des Gebäudes. Diese Lufteintrittsöffnungen sind während der Wärmenutzung geschlossen. Durch Gitter wird das Eindringen von Gegenständen (z.B. Blätter usw.) während des Notkühlbetriebes verhindert. Das Eindringen von Flüssigkeiten

(Regenwasser, Kerosin, usw.) wird durch eine Kante verhindert, die die von oben eintretende Flüssigkeit durch den unteren Kanal wieder nach außen austreten läßt.

Auf die Lufteintrittsöffnungen wirkende Druckwellen entspannen sich aufgrund der gewählten Geometrie und machen sich somit nicht oder nur stark abgeschwächt im Lager bemerkbar.

Die so einströmende Luft tritt von unten in die vorgegebenen Ringräume, kühlt den Lagerbehälter von unten nach oben steigend und gelangt durch Abluftkamine oberhalb der Betonkuppel wieder ins Freie. Eine schematische Darstellung der Naturkonvektionskühlung im Lager zeigt Bild 7-2.

7.2.1.1 Temperaturentwicklung im Übergangslager bei Naturkonvektionskühlung

Bei der Berechnung der Temperaturen im Übergangslager während der Kühlung mittels Naturkonvektion wurde unterstellt, daß die Klappen sofort nach Ausfall der Betriebskühlung geöffnet wurden. Nach dem Öffnen der Zuluftklappen erfolgt der Druckausgleich zwischen Umgebung und Zuluftkanälen in der Gebäudewand. Bedingt durch den Gewichtsunterschied in den Zuluftkanälen und im Lagerbereich steigt der Druck im Fundamentraum an und schiebt die warme Luft aus dem Lagerbereich über die Abluftkanäle ins Freie. Das Berechnungsmodell zur Simulation der Naturzugkühlung mit THERMIX-KONVEK-LOOPY wird im Anhang C erläutert.

Es stellt sich eine stationäre Strömung ein, deren Strömungsdruckverlust mit der durch die Temperaturdifferenz zwischen Ab- und Zuluft gebildeten Auftriebsdifferenz sowie mit deren Höhendifferenz übereinstimmt.

Infolge der durch die Betriebskühlung geprägten Oberflächentemperaturen von Behälterströmungsführung und Beton stellt sich zunächst ein Kühlluftstrom von 35 kg/s ein, der sich von 35 auf 75 Grad C erwärmt und 1450 kW Wärme abführt (Bild 7-3). Bei dieser intensiven Strömung kühlen der untere Lagerbereich sowie die Oberflächen von Lagerbehälter und Strömungsführung sehr schnell ab. Die Folge ist ein stetiger Rückgang der Kühlluftaufheizung in den ersten 60 Stunden auf 64 Grad C (Bild 7-3), wodurch auch die Auftriebsdruckdifferenz und damit der Massenstrom ebenfalls stetig sinken (auf 31,2 kg/s). Dies bewirkt, daß mit ca. 980 kW weniger Wärme abgeführt als produziert wird. Hierdurch verschiebt sich das Temperaturprofil im Lagerbehälter und in der Strömungsführung solange, bis sich die Strömung nach ca. 250 h stabilisiert hat. Die wesentlichen Daten der stationären Naturzugkühlung sind:

- Kühlluftdurchsatz	32 kg/s
- Ablufttemperatur	67 Grad C
- maximale Behälter-Oberflächentemperatur	162 Grad C
- maximale Gebäude-Innenwandtemperatur	78 Grad C
- maximale Lagerschacht-Temperatur	300 Grad C
- maximale Glastemperatur bei 15 W/dm ³	450 Grad C

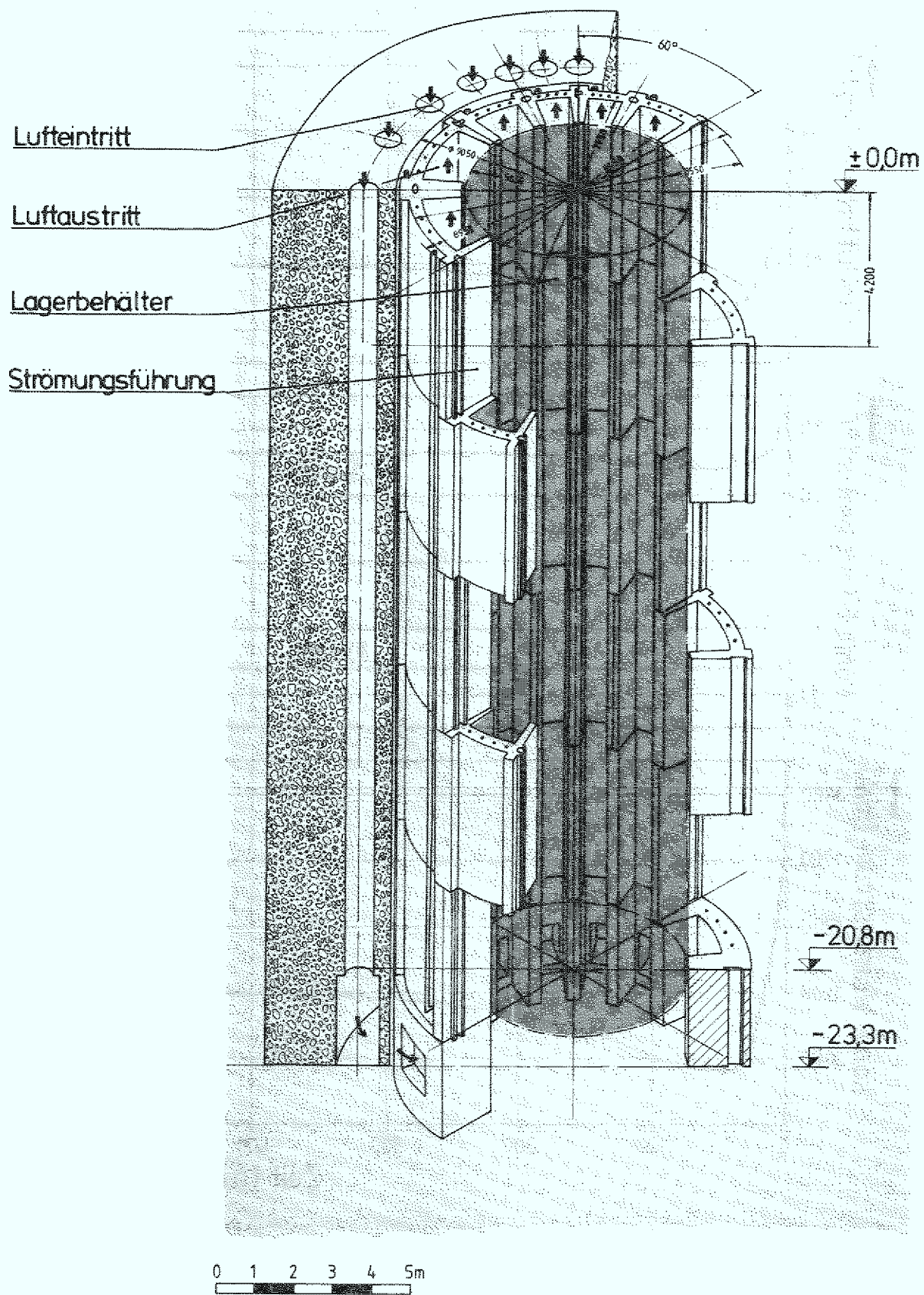


Bild 7-2: Notkühlung durch freie Konvektion

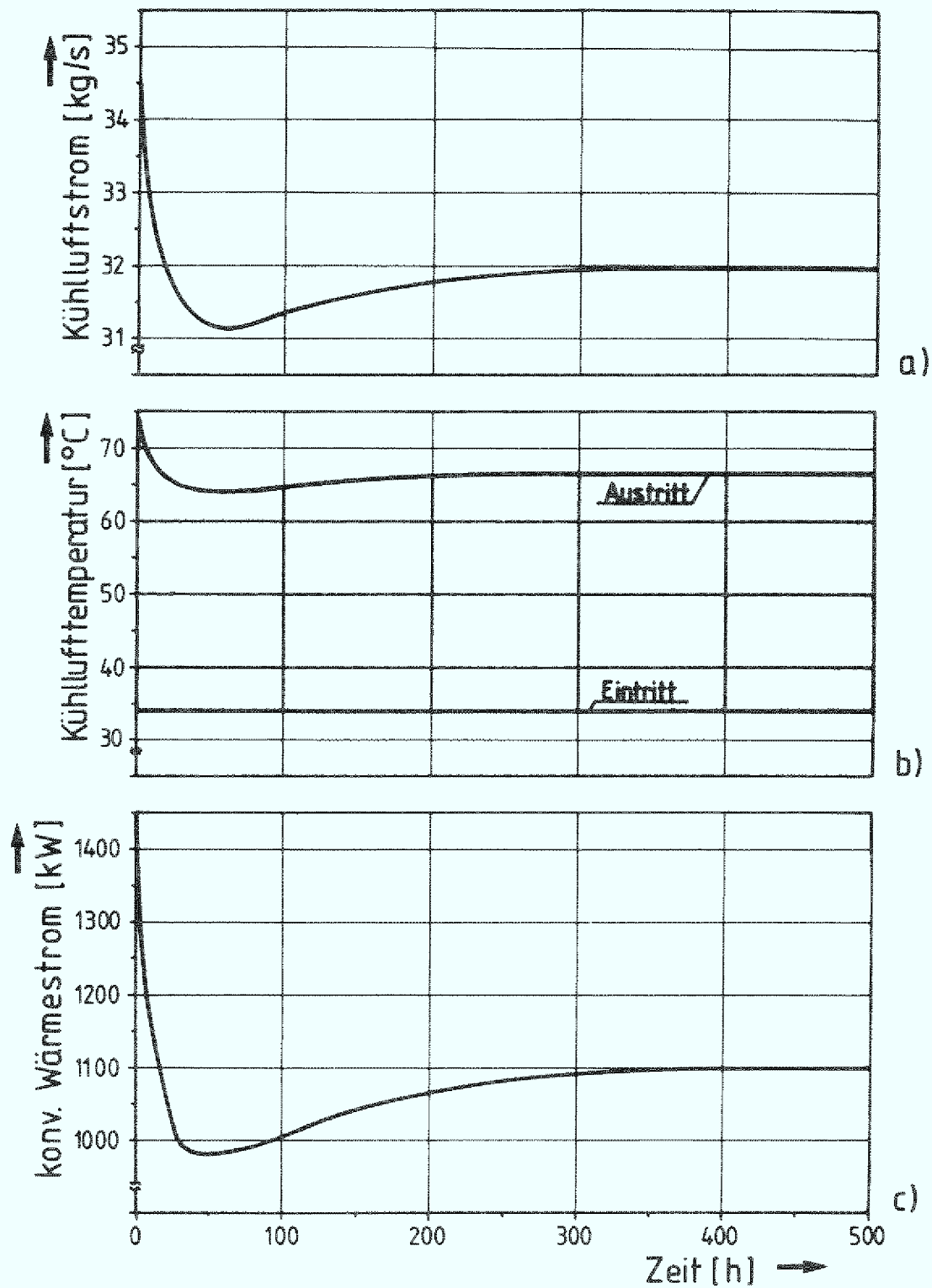


Bild 7-3: Anlaufverhalten der Naturkonvektionskühlung bei einem frisch beladenen Übergangslager und Einsatz sofort nach Ausfall des Betriebskühlsystems

Bild 7-4 zeigt anhand von Isothermen die stationäre Temperaturverteilung im Übergangslager bei Naturzugkühlung. Die Verschiebung der Temperaturverteilung wird in Bild 7-5 deutlich, wo die Temperaturprofile der heißesten Zonen bei Naturzugkühlung und Normalbetrieb gegenübergestellt sind. Abschließend sind in Bild 7-6 die im stationären Zustand auftretenden Strömungsdruckverluste, die Absolutdrücke an einigen charakteristischen Punkten (als Erhöhung zum Referenzdruck) und die in die Rechnung einbezogenen Stoßverluste an Querschnittsveränderungen aufgetragen.

Die sich einstellenden stationären Betriebsdaten bei Naturkonvektionskühlung sind in Bild 7-7 in Abhängigkeit von der Betriebszeit des Lagers aufgetragen. Das Wärmeangebot sinkt im Laufe der Betriebszeit des Lagers entsprechend Bild 6-8. Demzufolge ist auch der sich bei einem Störfall stationär einstellende Kühlluftstrom niedriger, gleiches gilt für die Kühllufttemperatur. Bei einer Abschaltung der Betriebskühlung nach längerer Betriebszeit z.B. nach 20 Betriebsjahren und einer ausschließlichen Kühlung des Übergangslagers durch Naturkonvektion stellen sich im wärmsten Glasblock Zentraltemperaturen von ca. 235 Grad C ein (Bild 7-7a). Die Ablufttemperatur beträgt dann 50 Grad C, und der Massenstrom stellt sich auf ca. 26 kg/s ein.

Auch bei einem um 240 h verzögerten Einsetzen der Naturkonvektionskühlung werden im frisch beladenen Zustand keine unzulässigen Temperaturen erreicht. Die Wirkung der Naturkonvektionskühlung bei einem frisch beladenen Übergangslager ist in Bild 7-8 und in Bild 7-9 dargestellt. Bild 7-8 verdeutlicht den Verlauf der max. Glastemperatur während der Naturkonvektionskühlphase. Setzt die Naturkonvektionskühlung sofort nach Störfallbeginn ein (Kurve $t=0$ h), so steigt die Maximaltemperatur von 380 auf 450 Grad C, wo sie stabil verharret.

Ein verspäteter Kühlungseinsatz -240 h nach Störfalleintritt- führt zunächst aufgrund der unterstellten adiabaten Aufheizung (s. Kap. 7.2.3) zum Anstieg der Glastemperatur auf 570 Grad C und dann nach Öffnen der Klappen zu einem schnelleren Abfall der Maximaltemperaturen mit einer Stabilisierung bei 450 Grad C.

Bild 7-9 gibt den Verlauf der maximalen Glastemperatur in Abhängigkeit des Zuströmquerschnitts der Umgebungsluft wieder. Die Strömungsquerschnitte (Anhang C: Bild C-2, Komponenten Nr. 12, 13, 14, 16 und 17) wurden hierzu von 9,3 m² auf das in der jeweiligen Kurve angegebene Maß reduziert. Hier ist ebenfalls vorausgesetzt, daß die Naturkonvektionskühlung in entsprechendem Umfang erst 240 h nach Beginn der adiabaten Aufheizung eingeleitet wird. Bei Freigabe der halben Strömungsfläche stabilisiert sich die maximale Glastemperatur bei 480 Grad C, im Gegensatz zu 450 Grad C bei vollem Strömungsquerschnitt. Selbst bei Öffnung von lediglich 25% der vorgesehenen Lufteintrittskanäle stabilisiert sich die Glastemperatur bei maximal 530 Grad C. Die Verminderung der Strömungsquerschnitte bewirkt somit lediglich eine Anhebung des stationären Temperaturniveaus sowie eine Streckung der Abkühlzeit bis zum Erreichen des stationären Zustandes und kein vollständiges Versagen dieses Kühlmechanismus. Die Integrität der Glasblöcke ist daher bei einer Rekristallisationstemperatur von 600 Grad C und bei nur langsam verlaufender Aufheizung bzw. Abkühlung nicht gefährdet.

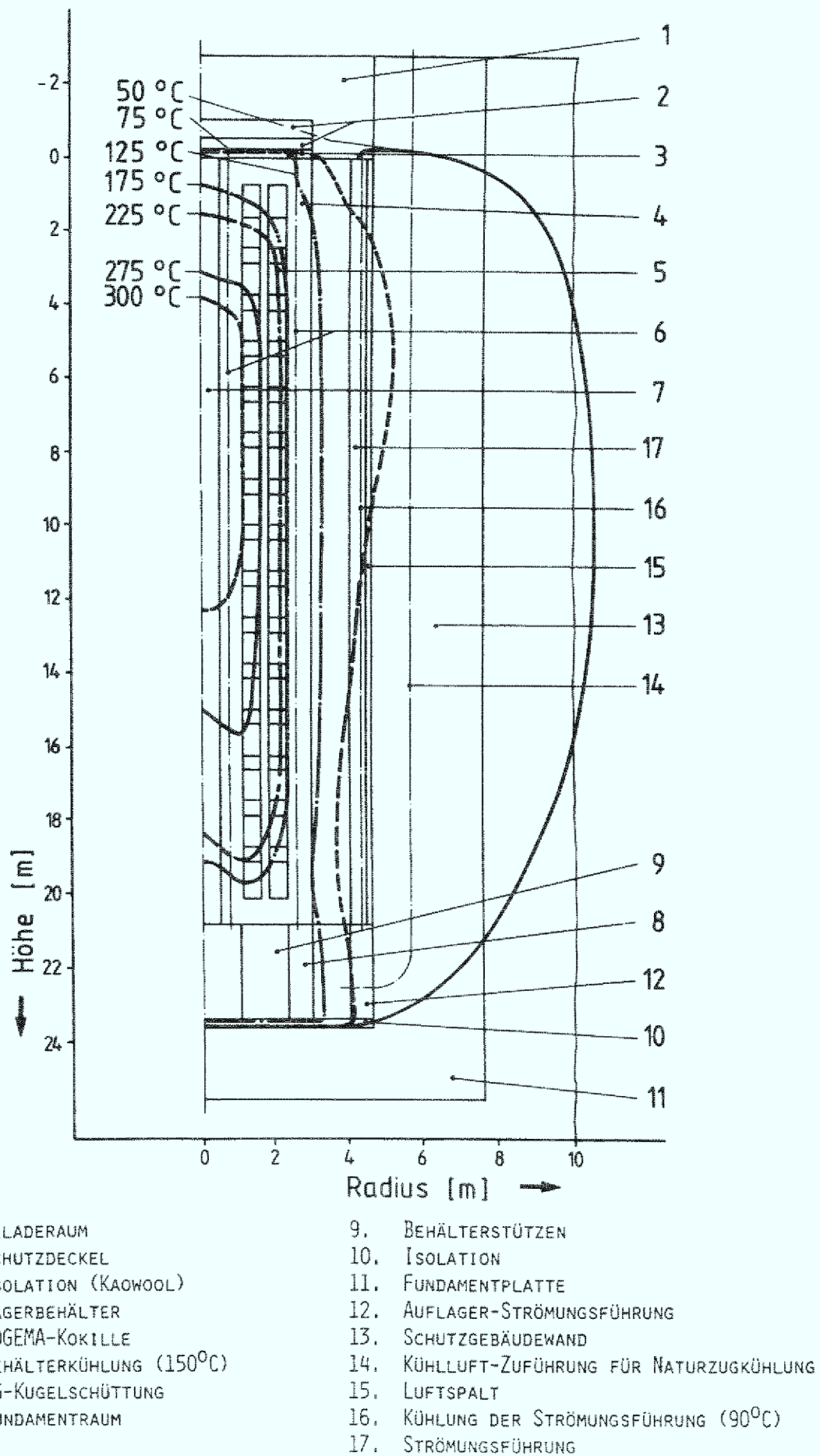


Bild 7-4: Stationäre Temperaturverteilung in einem luftgekühlten Übergangslager bei 1100 kW Wärmeabfuhr

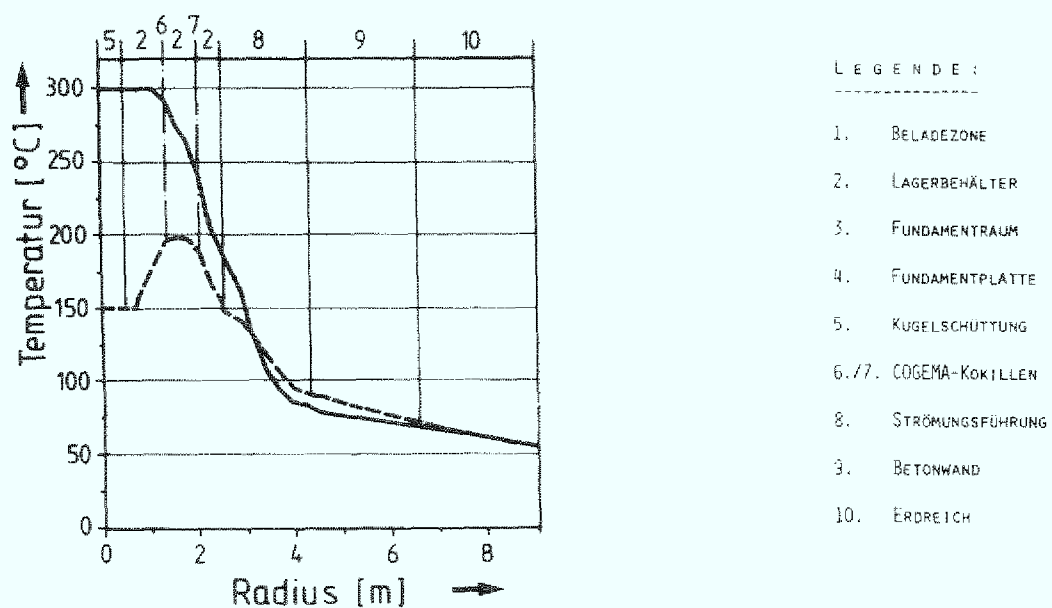
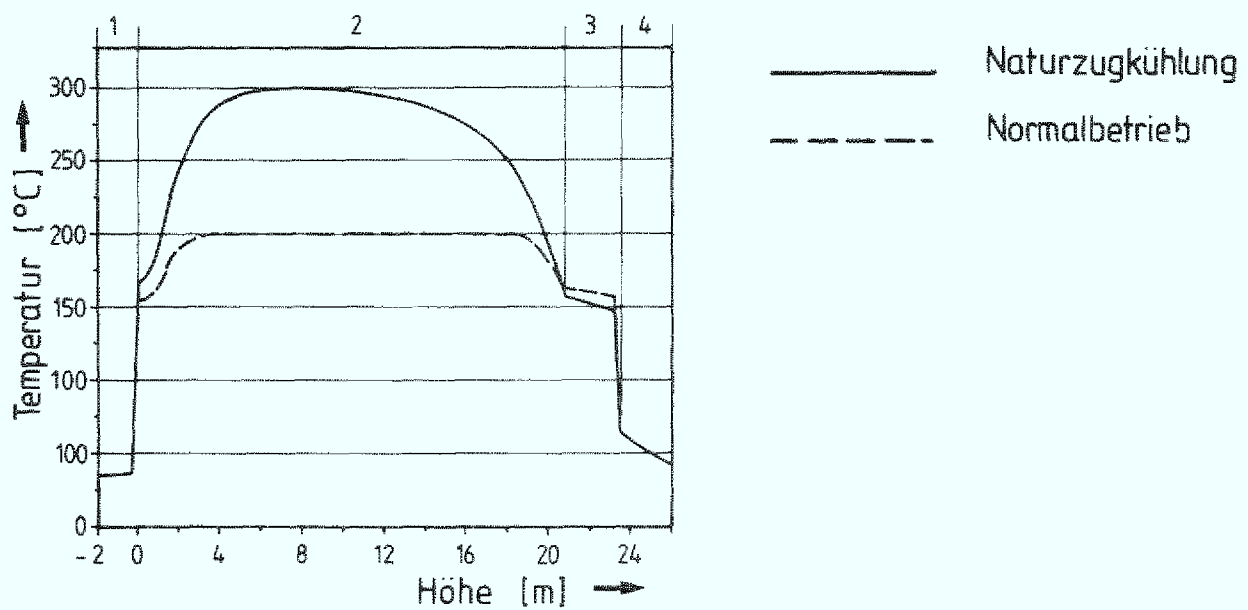
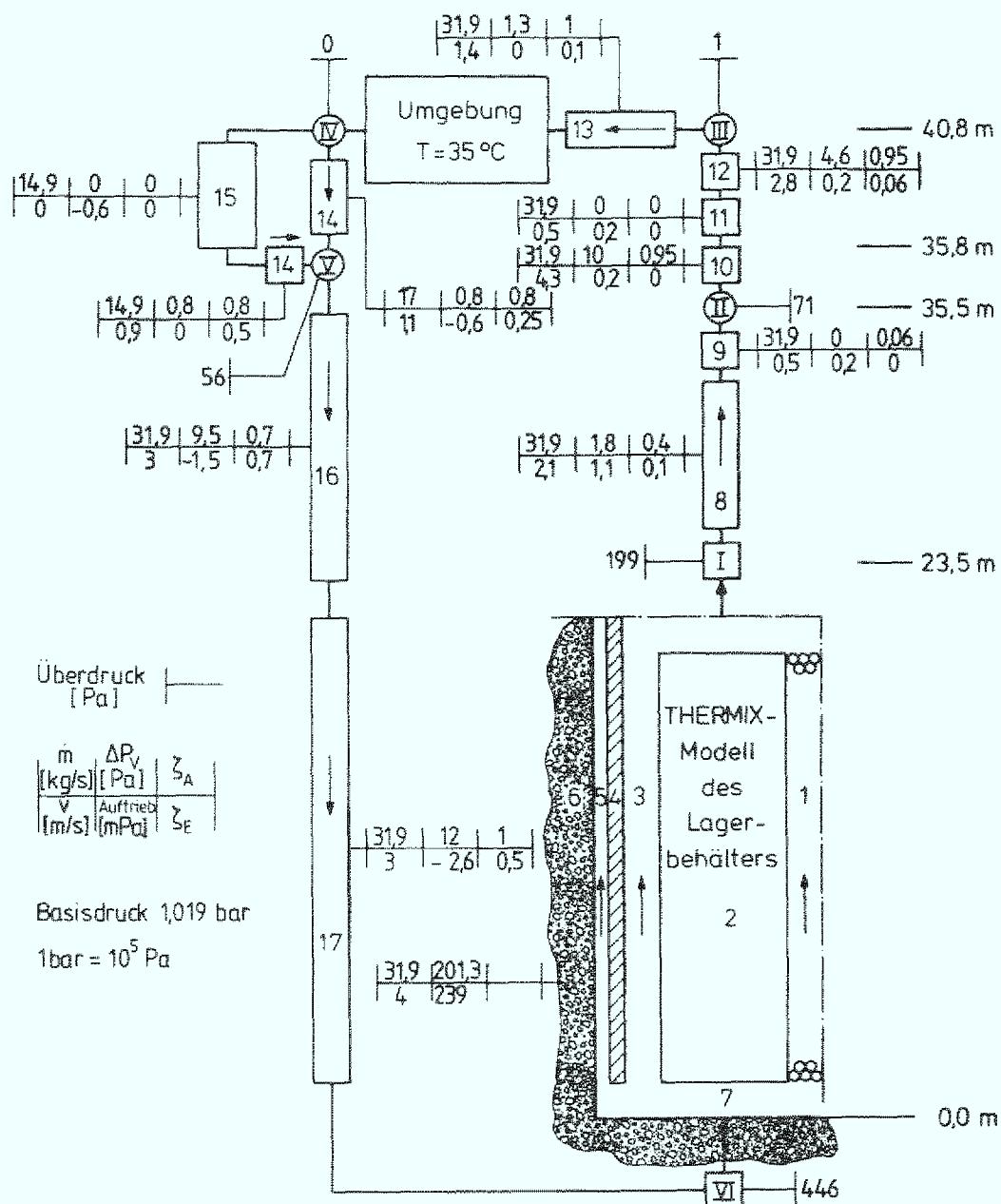


Bild 7-5: Axialer und radialer Temperaturverlauf bei stationärer Naturzugkühlung in den heißesten Zonen des Übergangslagers im Vergleich zum Normalbetrieb mit Wärmenutzung



- | | |
|---------------------------|---|
| 1. KUGELSCHÜTTUNG | 9. SAMMELRAUM INNEN |
| 2. LAGERBEHÄLTER | 10. DURCHTRITT INNERE DECKE |
| 3. STRÖMUNGSKANÄLE INNEN | 11. SAMMELRAUM AUSSEN |
| 4. STRÖMUNGSFÜHRUNG | 12. DURCHTRITT ÄUSSERE DECKE |
| 5. STRÖMUNGSKANÄLE AUSSEN | 13. ABSTRÖMUNG ZUR UMGEBUNG |
| 6. BETONGBÄUDE | 14. ANSAUGÖFFNUNGEN |
| 7. FUNDAMENTRAUM | 15. HILFSKOMPONENTE (KEIN DRUCKVERLUST) |
| 8. WARMLUFTKANÄLE | 16/17. ZUSTRÖMKANÄLE IN DER GEBÄUDEWAND |

Bild 7-6: Druckverluste, Stoßverluste, Absolutdrücke, Massenströme und Geschwindigkeiten bei stationärer Naturzugkühlung eines frisch beladenen Übergangslagers

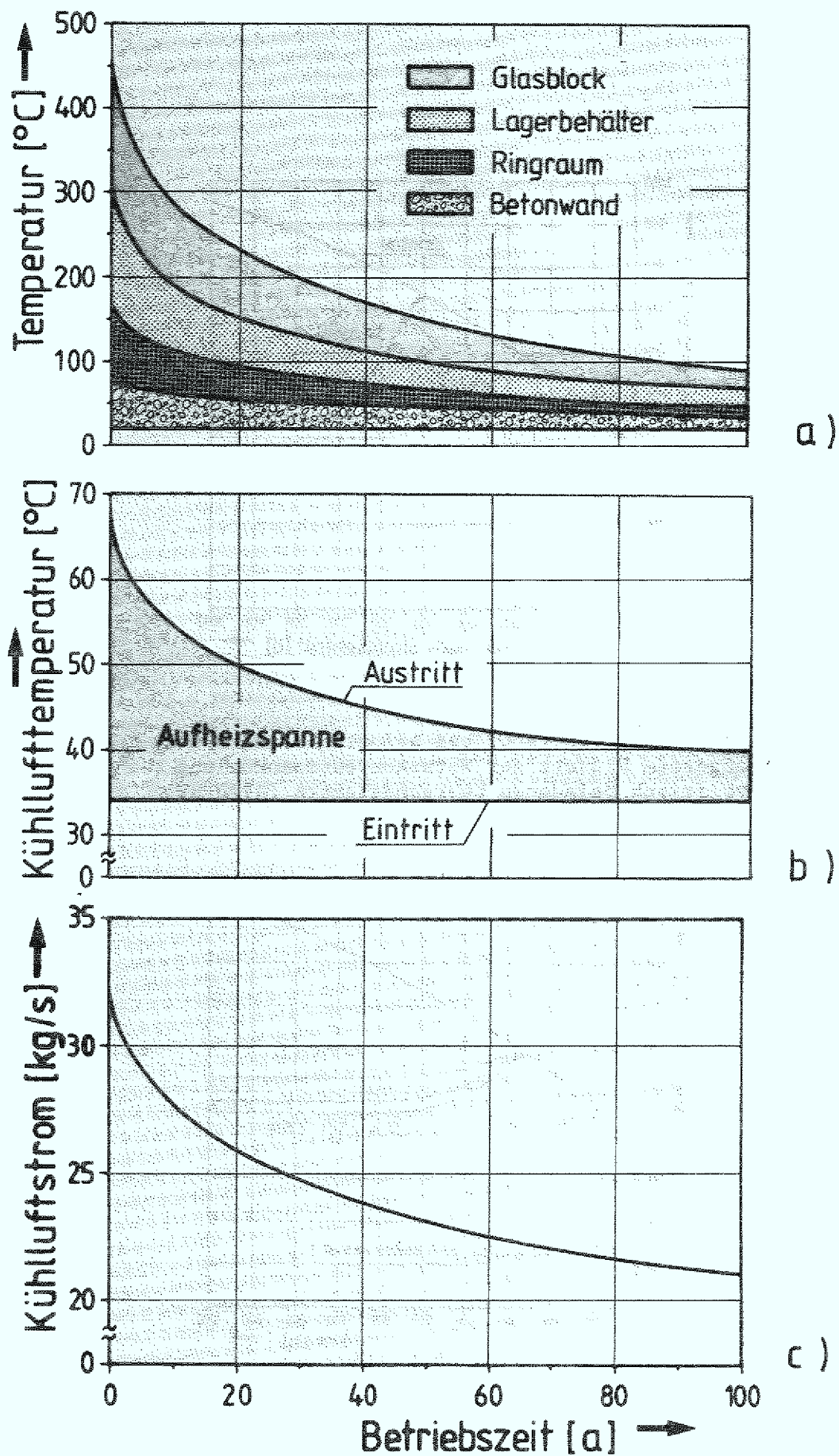


Bild 7-7: Betriebsdaten bei Naturkonvektionskühlung des Übergangslagers über einem Betriebszeitraum von 100 Jahren
a) charakteristische stationäre Lagertemperaturen
b) stationäre Kühllufttemperaturen
c) stationärer Kühlluftstrom

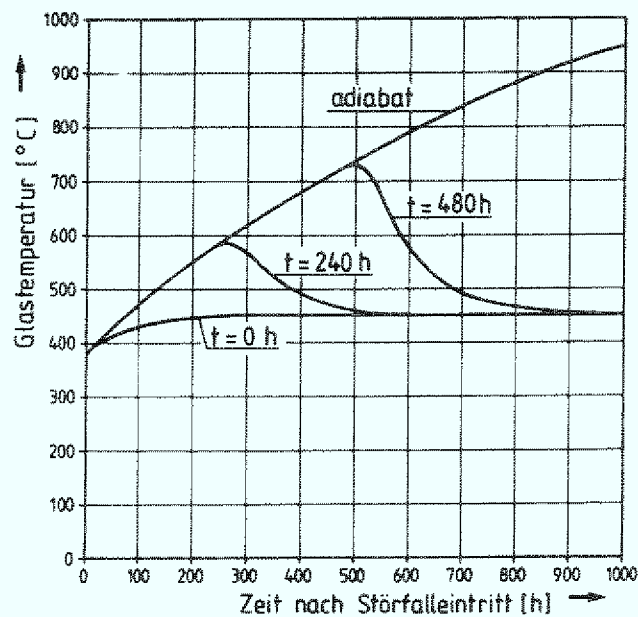


Bild 7-8: Maximale Glastemperatur bei sofortigem und bei um t verzögertem Einsatz der Naturkonvektionskühlung eines frisch beladenen Übergangslagers (1100 kW)

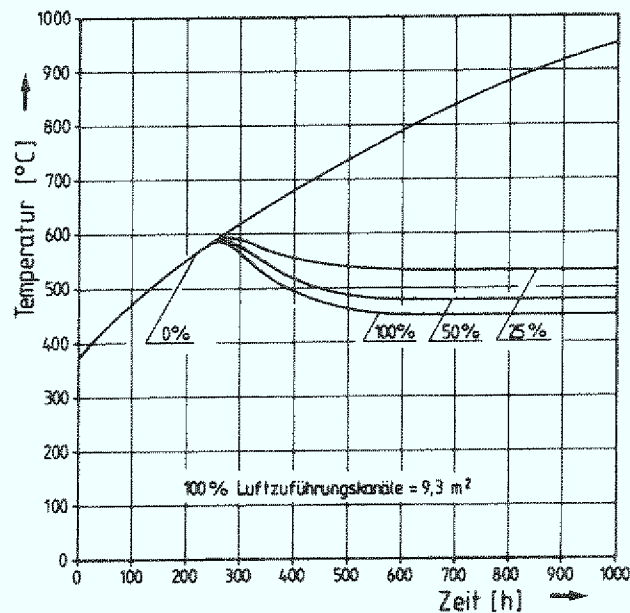


Bild 7-9: Maximale Glastemperatur bei um 240 h verzögerter Inbetriebnahme der Naturkonvektionskühlung mit unterschiedlich großen Zuströmquerschnitten: 100% = 9,3 m², Thermische Leistung = 1100 kW

7.2.2 KÜHLUNG DES ÜBERGANGSLAGERS DURCH BESPRÜHUNG DER LAGERBEHÄLTEROBERFLÄCHE MIT WASSER

Die zweite wirksame Notkühlung des Lagerbehälters läßt sich durch eine Wasserberieselung der heißen Behälterstrukturen herbeiführen (Bild 7-10). Die Wärmeabfuhr erfolgt hierbei durch Aufwärmen und Verdampfen des aufgesprühten Wassers.

Die notwendigen Anschlußleitungen für das Sprühsystem sind von sehr einfachem Aufbau und äußerst niedrig belastet. Aus diesen Gründen und wegen der 2-fachen Redundanz ist dieses Notkühlsystem als sehr zuverlässig zu beurteilen, zumal ein Einsatz erst nach relativ langer Wartezeit (ca. 10 Tage) erforderlich ist.

Zur Einspeisung des Kühlwassers sind zwei voneinander unabhängige Ringrohrsysteme (DN 25) mit je 2 an der Gebäudeaußenseite liegenden Wasseranschlüssen vorgesehen. Die Anschlüsse sind entsprechend der Klassifikation "C" der Feuerwehr ausgeführt und verfügen über separate Absperrkugelhähne und Filter, die für die Düsen schädliche Schmutzpartikel aus dem Leitungssystem zurückhalten /7-3/.

Zur Kompensation von großen Relativverschiebungen zwischen Gebäude und Strömungsführung, die die Ringsysteme trägt, dienen flexible Ringwellschläuche.

Von jedem Ringrohrsystem führt pro Lagerschacht eine mit 20 Sprühdüsen bestückte Fallrohrleitung (DN 10) bis zur Bodenplatte des Lagerbehälters. Die thermischen Axialdehnungen der Düsenleitungen werden durch Ringwellschläuche aufgenommen.

Die Wassereinspeisung kann nun extern vom Hydranten, von Feuerlöschfahrzeugen oder durch tragbare Feuerweerpumpen aus einem Löschteich erfolgen. Das kleinste heute verwendete Pumpenaggregat der Feuerwehren hat einen Förderstrom von ca. 500 l/min bei einem Druck zwischen 4 und 5 bar.

Bei vollständiger Verdampfung des aufgesprühten Wassers ist zur Wärmeabfuhr eines frisch beladenen Übergangslagers ein Massenstrom von weniger als 0,8 kg/s erforderlich. Das überschüssige Wasser läuft an der Behälteroberfläche herunter und unterstützt so die Kühlwirkung durch konvektive Wärmeaufnahme.

7.2.2.1 Temperaturentwicklung im Übergangslager bei Besprühen der Lagerbehälteroberfläche mit Wasser

Zur rechnerischen Simulation mit dem Programm THERMIX wurde unterstellt, daß sich das Übergangslager bereits seit 240 h ohne jede Kühlung adiabat bei einer Wärmeproduktion von 1100 kW aufgeheizt hat. Anschließend setzt die Wasserbesprühung der Behälteraußenseite mit einem zeitlich konstanten Massenstrom von 8,5 kg Wasser/s ein.

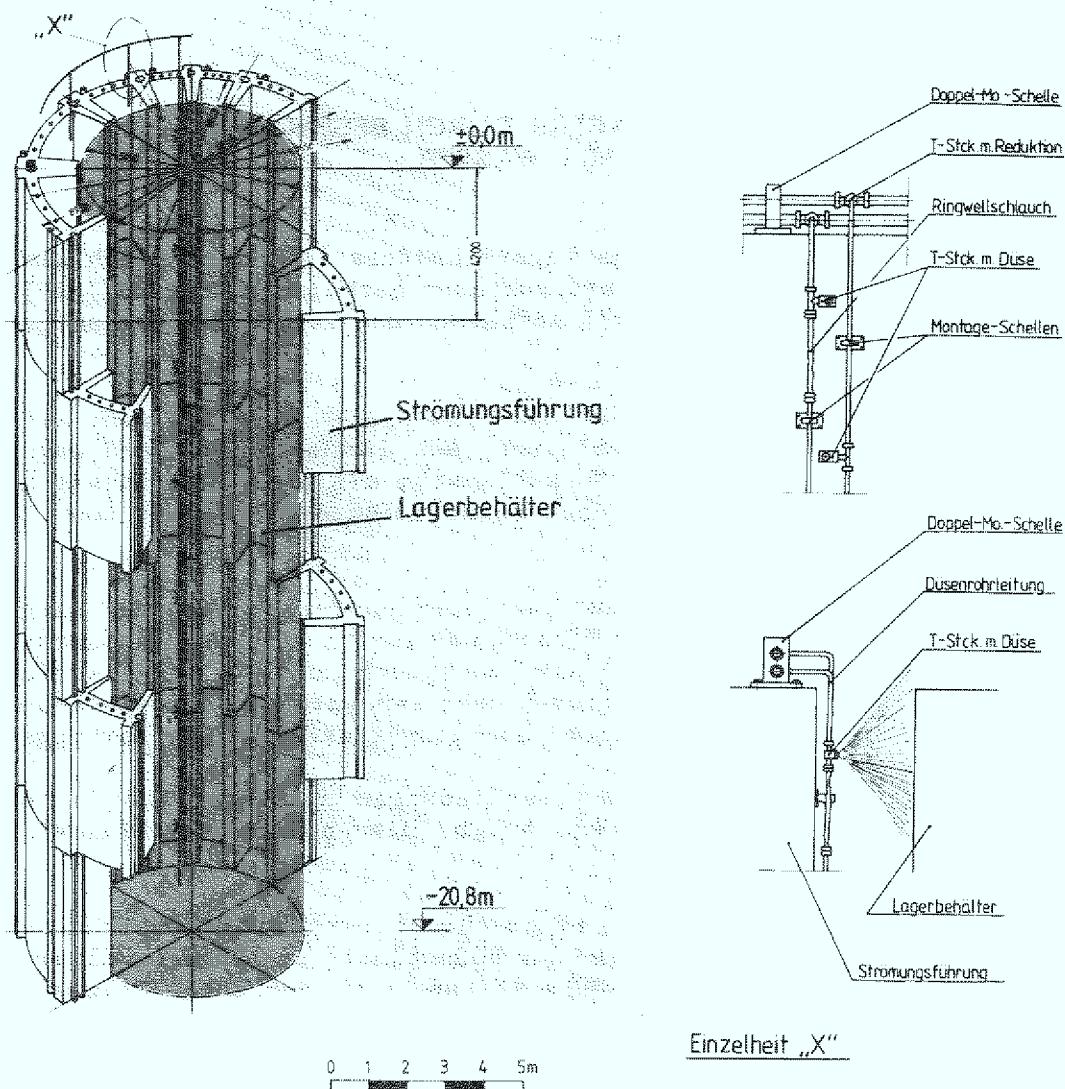
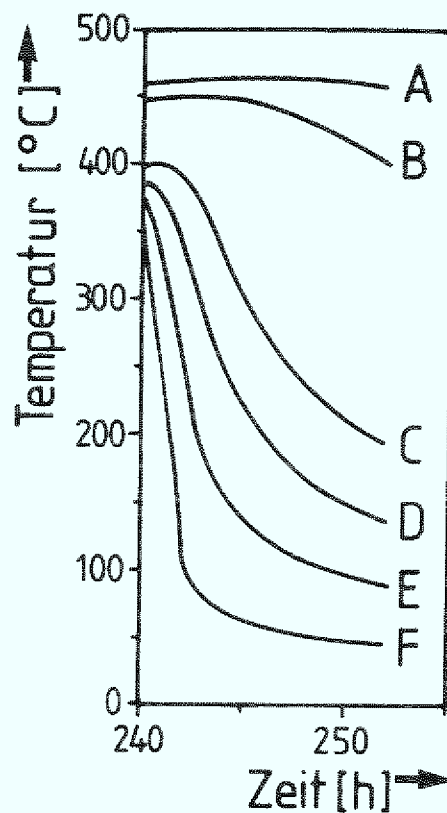
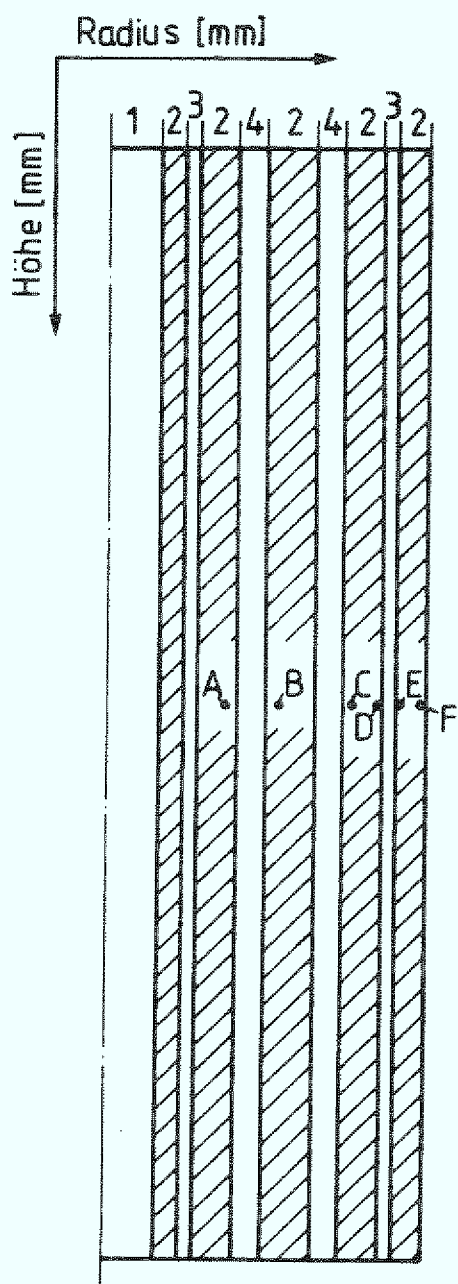


Bild 7-10: Notkühlung durch Wasserberieselung

Die Beschreibung des Wärmeübergangs von der Behälteroberfläche an das aufgesprühte Wasser erfolgte entsprechend den im VDI-Wärmeatlas /7-4/ genannten Gesetzen für Blasensieden, Fallfilmverdampfung oder nichtsiedende Rieselfilme, je nach der sich zeitlich verändernden Behälteroberflächentemperatur.

Infolge der Besprühung des Behälters und der Verdampfung des Wassers an der Oberfläche stellt sich ein ausgesprochen intensiver Wärmetransport ein. Er wird im vorliegenden Fall lediglich durch die aufgesprühte Wassermenge begrenzt, die unter den gegebenen Umständen zu Beginn der Kühlphase vollständig verdampfen könnte. Um zu einer pessimistischen Abschätzung der Kühlwirkung zu gelangen, ist als Maximum der Wärmeübergangszahl der Wert zugelassen, der zum Verdampfen von 50% des aufgesprühten Wassermassenstromes führen würde.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 7-11 und 7-12 anhand von Temperaturzeitverläufen definierter Behälterpunkte sowie durch radiale Temperaturschnitte an der heißesten Stelle des Lagerbehälters dargestellt.

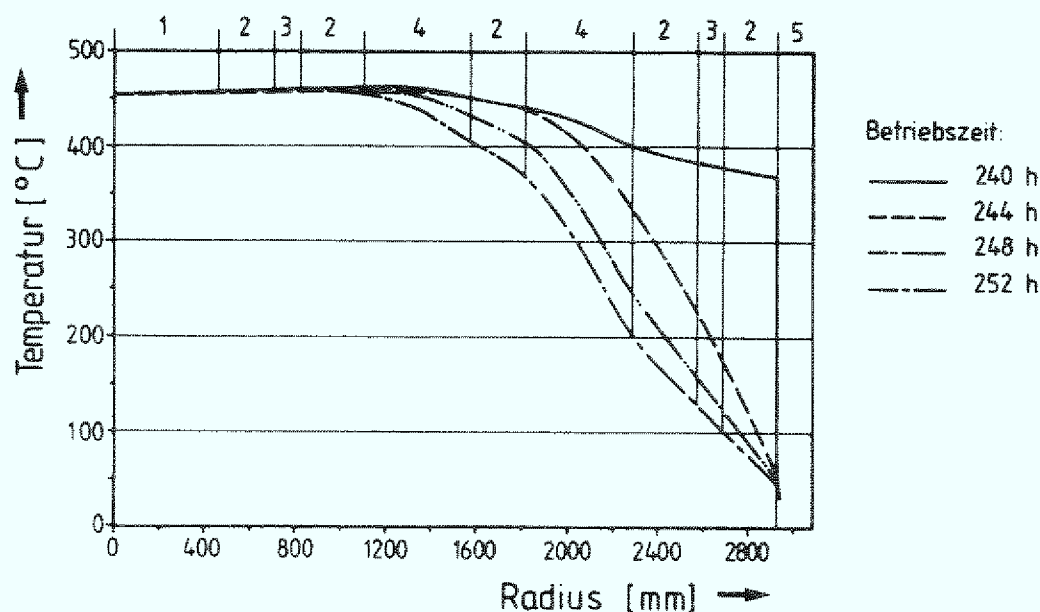


	Radius	Höhe
A	1118	10.350
B	1580	10.350
C	2283	10.350
D	2528	10.350
E	2725	10.350
F	2900	10.350

1. Kugelschüttung
2. Lagerbehälter

3. Behälterkühlung
4. Position der Glasblöcke

Bild 7-11: Temperaturzeitverläufe in der heißesten Ebene des Übergangslagers bei Besprühung der Außenfläche mit 8,5 kg Wasser/s nach vorangegangener, 240stündiger, adiabater Aufheizung



- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1. Kugelschüttung | 4. Position der Glasblöcke |
| 2. Lagerbehälter | 5. Kühlluftkanal |
| 3. Behälterkühlung | |

Bild 7-12: Radiale Temperaturschnitte durch die heißeste Ebene des Übergangslagers bei Besprühung der Außenfläche mit 8,5 kg Wasser/s nach vorangegangener 240stündiger adiabater Aufheizung

Bild 7-11 ist zu entnehmen, daß die äußeren Regionen des Lagerbehälters, die Punkte D, E und F, binnen 10 h auf die Lagerbehälter-Normaltemperatur heruntergekühlt werden. Im Zentrum des Lagerbehälters (Punkt A) ist innerhalb dieses Zeitraumes keine wesentliche Temperaturabsenkung erkennbar, da zuerst die in den Außenzonen gespeicherte Wärme abgeführt wird.

Zu gleichen Ergebnissen kommt man bei der Betrachtung von Bild 7-12. Auch hieraus ist zu entnehmen, daß die Temperaturabsenkung in der Innenzone des Lagerbehälters für den betrachteten Zeitraum unbedeutend ist. Die Ursache liegt in der, verglichen mit dem äußeren Wärmeübergang geringen Wärmeleitung des Lagerbehältermaterials und natürlich an der gewählten Anordnung des Wärmeabfuhrsystems.

Aus diesen Abkühlkurven ist aber ebenso erkennbar, daß bei Aufrechterhaltung der Außenkühlung mit zeitlicher Verzögerung auch eine Temperaturabsenkung in den zentralen Bereichen des Lagerbehälters erfolgt (Bild 7-11, Kurve A, B).

Eine gleichzeitige Berieselung der zentralen Kugelschüttung, die bei der Rechnung vernachlässigt wurde, aber im Konzept vorgesehen ist, führt entsprechend den dargestellten Ergebnissen auch im zentralen Bereich des Behälters zu einer schnellen Temperaturabsenkung.

7.2.3 VOLLSTÄNDIGER AUSFALL ALLER KÜHLSYSTEME

Das Übergangslager zeigt aufgrund seiner großen wärmespeichernden Strukturmassen ein sehr träges thermodynamisches Verhalten. Diese Eigenart kommt bei der Betrachtung der Störung "Vollständiger Ausfall aller Kühlsysteme" sehr deutlich hervor.

Die Berechnungen zur adiabaten Aufheizung wurden unter den folgenden Voraussetzungen durchgeführt:

- Wärmefreisetzung 1100 kW,
- keine Konvektion innerhalb des Schutzgebäudes während der Aufheizung,
- das umgebende Erdreich ist trocken,
- die Schmelzwärmen bleiben unberücksichtigt.

Bild 7-13 zeigt den Temperaturverlauf während einer unterstellten adiabaten Aufheizung des Gesamtsystems für verschiedene Materialbereiche. Die maximale Glastemperatur steigt innerhalb der 200 h mit ca. 0,9 Grad C/h. Sie erreicht nach 80 h den Wert von 450 Grad C und überschreitet zu diesem Zeitpunkt die Spezifikationstemperatur der COGEMA für ihr Produkt (siehe Kap. 4.2). Der Beginn des Transformationsintervalls wird mit 510 Grad C erst nach einer Aufheizzeit von 160 h erreicht. Legt man das verbesserte Borosilikatglas aus neuerer Entwicklung zugrunde, so wird die Stabilitätsgrenze oberhalb 600 Grad C erst nach 280 h adiabaten Aufheizens erreicht. Somit müßte beim frisch beladenen Übergangslager spätestens nach 160 h bzw. 280 h eine wirksame Notkühlung eingeleitet werden, um eine partielle Rekristallisation von Teilen der eingesetzten Glasblöcke zu vermeiden. Zu diesem Zeitpunkt besteht noch keine Gefahr einer Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Übergangslager.

7.3 DIE SPALTPRODUKTBARRIEREN DES ÜBERGANGSLAGERS

Das Übergangslager schließt auf relativ engem Raum ein großes Radioaktivitätsinventar ein, welches während der angestrebten oberirdischen Lagerzeit von ca. 100 Jahren sicher und zuverlässig von der Biosphäre ferngehalten werden muß. Zur Gewährleistung dieser Anforderungen wird, wie bei kerntechnischen Anlagen üblich, ein gestaffeltes Mehrbarrierensystem angewendet. In den einschlägigen Regelwerken ist eine Wiederholungsprüfung und im Bedarfsfall eine Reparatur oder ein Austausch der einzelnen Barrieren vorgesehen.

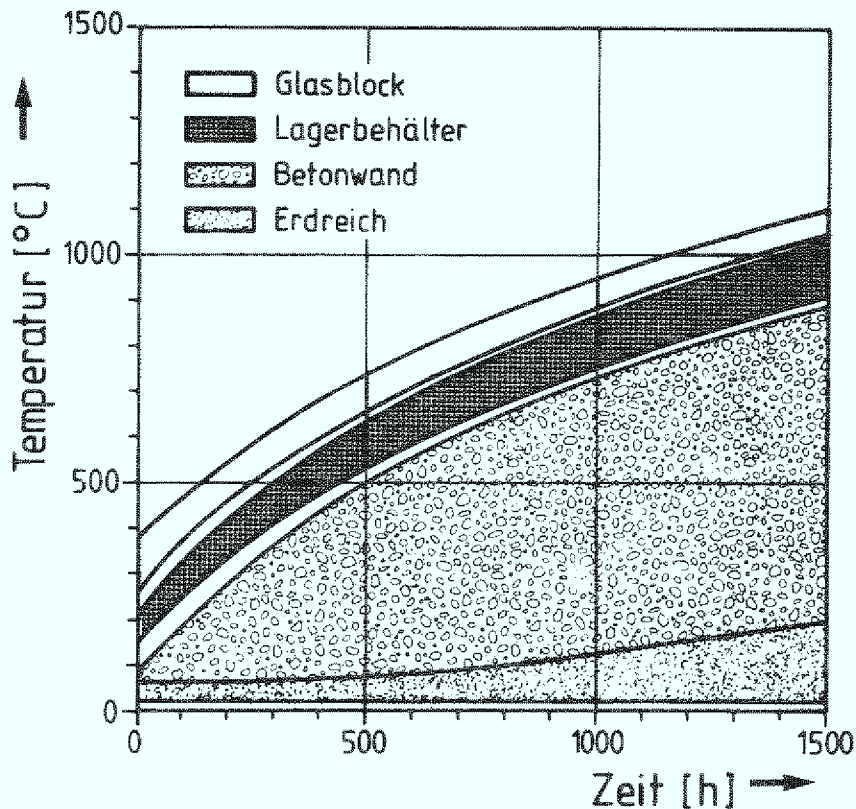


Bild 7-13: Temperaturverlauf verschiedener im Übergangslager eingesetzter Materialien bei ungehinderter Aufheizung (ohne Berücksichtigung von Schmelzwärmen) des Gesamtsystems

Im Normalbetrieb sind konstruktiv fünf Aktivitätsbarrieren vorhanden:

- der Glaskörper,
- der Edelstahlmantel des Glaskörpers,
- der Edelstahlliner im Lagerschacht,
- der Doppelrohr-Wärmetauscher und
- der Sekundärwärmetauscher.

Das ins Übergangslager eingesetzte Element verfügt bereits über zwei Spaltproduktbarrieren. Die erste Barriere, der Glaskörper aus Borosilikatglas, bildet für die spätere Endlagerung die Immobilitätsbarriere für die Spaltprodukte. Sie kann aber durch Temperatureinwirkungen stark beeinträchtigt bzw. zerstört werden. Die zweite Barriere, der Edelstahlmantel des Glaskörpers, dient beim Abguß des Glases als Form und bei der späteren Handhabung als Schutz. Nach dem Erkalten des Glases wird er gasdicht verschweißt /7-5/. Aufgrund seiner geringen mechanischen Festigkeit (5 mm Wandstärke, 2 Schweißnähte) darf er keinen hohen Belastungen ausgesetzt werden. Diese beiden Barrieren sind keiner Wiederholungsprüfung zugänglich. Daher werden weitere Spaltproduktbarrieren vorgesehen.

Als dritte Aktivitätsbarriere dient der in jedem Lagerschacht eingesetzte Edelstahlliner (Kap. 4.3.2.1). Er ist während des Betriebes und auch wäh-

rend möglicher Störfälle keinen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Diese Barriere wird durch den Primärdeckel des Lagerschachtes (Kap. 4.3.2.2) abgeschlossen. Die Gasdichtheit kann kontinuierlich durch Bestimmung des Innendrucks festgestellt werden.

Die vierte Spaltproduktbarriere bildet im Normalbetrieb der im Stahlgußbehälter integrierte Doppelrohr-Wärmetauscher. Sie wird dadurch gewährleistet, daß die Fugen der gestapelten Scheiben nach der Montage gasdicht verschweißt und die Bohrungen für die Spannkabel gasdicht abgeschlossen werden. Die Gasdichtheit kann z.B. durch Heliumschnüffler nachgewiesen werden, indem man nach Fertigstellung aller Dichtungsmaßnahmen Helium ins "Innere" der Barriere einbringt und die Außenfläche des Lagerbehälters abschnüffelt. Die Scheiben des Lagerbehälters sind konstruktiv so ausgeführt, daß die Dichtschweißungen an den Fugen durch Ultraschallprüfungen auf Risse oder Einschlüsse kontrollierbar sind. Über den Lagerschächten sorgt ein Sekundärdeckel für den Abschluß der vierten Barriere. Zur Überwachung der Deckeldichtungen und Lagerschächte sei auf Kap. 4.3.2.3 verwiesen.

Die fünfte Aktivitätsbarriere bilden im Normalbetrieb mit Wärmenutzung die Sekundärwärmetauscher sowie das gerichtete Druckgefälle vom Sekundärkreislauf über den Primärkreislauf zum Lagerbehälter hin.

Beim Ausfall des Betriebskühlsystems entfallen die beiden zuletztgenannten Barrieren. An die vierte Stelle tritt dann der gasdicht verschweißte Lagerbehälter, so daß sich in diesem Fall die Barrierenstaffelung wie folgt darstellt:

- der Glaskörper,
- der Edelstahlmantel des Glaskörpers,
- der Edelstahlliner im Lagerschacht und
- der Stahlguß-Lagerbehälter.

Somit enthält die Konzeption des Übergangslagers im Normalbetrieb fünf und im Störfall vier Aktivitätsbarrieren gegen den Austritt fester, flüssiger und gasförmiger Spaltprodukte und gewährleistet somit einen außerordentlich sicheren Aktivitätseinschluß.

7.4 THERMISCHE BELASTUNG DER SPALTPRODUKTBARRIEREN

7.4.1 NORMALBETRIEB

Die Belastungen der genannten fünf Spaltproduktbarrieren sind im Normalbetrieb sehr niedrig. So erreicht das Borosilikatglas in der heißesten Kanne nur eine Maximaltemperatur von 380 Grad C. Rekristallisation, d.h. verminderte Rückhaltefähigkeit für die eingebetteten Spaltprodukte, tritt aber erst bei Temperaturen oberhalb 510 bzw. 600 Grad C ein (vgl. Kap. 4.2).

Die Temperaturverteilung im Glaskörper verdeutlicht, daß nur ein sehr geringer Volumenanteil heißer als 360 Grad C ist. Der Grund liegt in der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Borosilikatglases. Der Edelstahlmantel ist daher nur Temperaturen von 240 Grad C ausgesetzt.

Bei einer Temperatur des Kühlmediums in den Doppelrohr-Wärmetauschern des Lagerbehälters von 150 Grad C stellt sich im Lagerschacht eine Temperatur von max. 200 Grad C ein. Somit liegen die Betriebstemperaturen der metallischen Einbauten ebenfalls weit unter den zulässigen Werten.

Dies gilt gleichermaßen für alle Komponenten der Wärmenutzungskreisläufe, da wegen der niedrigen Kühlwassertemperatur von nur 150 Grad C der Druck zur Vermeidung einer Dampfbildung auf 20 bar begrenzt werden kann.

7.4.2 AUSFALL DES BETRIEBSKÜHLSYSTEMS

Infolge der permanenten Wärmequelle im Lagerbehälter muß ständig eine ausreichende Wärmeabfuhr aus dem Übergangslager erhalten bleiben, um eine Aufheizung mit anschließender sukzessiver Zerstörung der Radioaktivitätsbarrieren zu verhindern. Bei einem vollständigen Versagen des Betriebskühlsystems muß die Wärmeabfuhr durch die beschriebenen Notkühlmechanismen

- freie Konvektion mit Umgebungsluft (Kap. 7.2.1) oder
- Besprühung des Behälters mit Wasser (Kap. 7.2.2)

erfolgen. Für diesen Fall sind vier Barrieren gegen Radioaktivitätsaustritt in die Umgebung vorgesehen (vgl. Kap. 7.3).

Die sich aufgrund der stetigen Wärmeentwicklung einstellenden, zeitlich variablen Temperaturen bestimmen das Ausmaß der auf die Spaltproduktbarrieren wirkenden Belastungen und beim Überschreiten der Festigkeitsgrenze deren Versagenszeitpunkt.

Entsprechend den Verläufen der in Bild 7-13 dargestellten Strukturmaterialtemperaturen während der adiabaten Aufheizung lassen sich bezüglich des Schädigungsgrades der eingesetzten Materialien und Spaltproduktbarrieren drei Ereigniskategorien ableiten:

- Störfall,
- Unfall und
- hypothetischer Unfall.

Entsprechend dieser Abgrenzung schließt der Störfall alle Aufheizphasen mit weniger als 80 Stunden Dauer ein. Ein Unfall ist eingetreten, falls die Dauer im Zeitraum zwischen 80 und 240 Stunden liegt. Aufheizzeiträume von mehr als 240 Stunden gelten als hypothetische Unfälle. Somit sind unter den genannten pessimistischen Annahmen für die thermodynamischen Berechnungen

- beim Störfall alle Zentraltemperaturen in den Glaskörpern kleiner als 450 Grad C, wie es die COGEMA-Spezifikationen erfordern (Kap. 4.2), und
- beim Unfall alle Zentraltemperaturen in den Glaskörpern kleiner als 600 Grad C, so daß noch keine Rekristallisation eingesetzt hat.

7.4.2.1 Diskussion der Folgen eines Störfalles

Die am höchsten belastete Aktivitätsbarriere ist das Borosilikatglas. Eine Zerstörung der Rückhaltefähigkeit kann einerseits durch mechanische Ursachen (Rißbildung), andererseits durch thermisch induzierte Gefügeumwandlungen (Rekristallisation) erfolgen.

Durch die angenommene Aufheizung des Übergangslagers steigt die maximale Glastemperatur innerhalb von 80 h auf 450 Grad C an. Wird innerhalb dieses Zeitraumes z.B. die Naturzugkühlung in vollem Umfang in Betrieb genommen, so bleiben die Maximaltemperaturen unterhalb dieser Grenze (Bild 7-8). Des weiteren gilt, daß nur ein geringer Volumenanteil des Glasblocks diesen Höchsttemperaturen ausgesetzt ist (vgl. Bild 6-10a) und daß die mittlere Glastemperatur um mehr als 60 Grad C niedriger ist. Aufgrund dieser Tatsache kann ein Überschreiten der von der COGEMA als Gewährleistungsgrenze spezifizierten Temperaturgrenze von 450 Grad C sicher ausgeschlossen werden.

Aufgrund des spröden mechanischen Verhaltens des Glases und der schlechten Wärmeleitfähigkeit ist zur Vermeidung von Rißbildungen die zulässige Temperaturänderungsgeschwindigkeit relativ niedrig zu halten. Bedingt durch die im Vergleich zur freigesetzten Wärme große wärmespeichernde Masse stellen sich maximale Aufheiztransienten von 20 Grad C/Tag ein. Hieraus ergeben sich ebenfalls keine Gefahren für die Integrität der Spaltproduktbarriere "Borosilikatglas" /vgl. 7-7/.

Die zweite Spaltproduktbarriere, der Edelstahlmantel, ist Höchsttemperaturen von 380 Grad C ausgesetzt. Mechanische und thermische Höchstbelastungen liegen jedoch nicht in der gleichen Zone. Während die thermische Belastung im stationären Luftkühlbetrieb bei 380 Grad C im oberen Behälterdrittel liegt, ist die mechanische aufgrund der Stapelung der Kannen im unteren Drittel zu suchen. Hier ist die Temperaturbelastung, bedingt durch die einströmende kalte Luft, um mehr als 100 Grad C niedriger (vgl. hierzu Bild 7-5).

Der Glasblock überträgt seine Wärme durch Wärmestrahlung an den Edelstahlliner des Lagerschachtes. Dieser Übertragungsmechanismus bedingt eine Temperaturdifferenz von ca. 60 Grad C, wodurch die dritte Spaltproduktbarriere, der Liner, also nur Maximaltemperaturen von weniger als 320 Grad C ausgesetzt ist. Das ist gleichzeitig auch die Höchsttemperatur des Stahlgußbehälters.

Abschließend kann nach der Diskussion der Temperaturbelastungen bei einem Störfall im Übergangslager folgendes festgehalten werden:

- Alle Spaltproduktbarrieren bleiben intakt und voll einsatzfähig.
- Es erfolgt keine radioaktive Freisetzung aus dem Glasblock.
- Ein Austausch von Radioaktivitätsbarrieren ist nach einem Störfall nicht erforderlich.

7.4.2.2 Diskussion der Folgen eines Unfalles

Bei Eintritt eines Unfalles überschreitet die maximale Glastemperatur die Gewährleistungsgrenze und erreicht nach 240 h ungehinderter Aufheizung Zentraltemperaturen von 570 Grad C. Somit bleibt die Rekristallisationsgrenze von 600 Grad C sicher unterschritten, falls bis zu diesem Zeitpunkt (10 Tage nach Eintritt) die Kühlung wiederhergestellt werden kann. Zur Beherrschung dieses Unfalles reicht, wie Bild 7-9 verdeutlicht, z.B. das Öffnen von 25% der insgesamt vorgesehenen Luftzufuhrkanäle oder die Einspeisung von 8,5 kg/s Wasser z.B. durch Tankfahrzeuge.

Die bei der Diskussion der Folgen eines Störfalles gemachten Aussagen zu den anderen Spaltproduktbarrieren gelten bei Eintritt eines Unfalles ebenso, es muß nur das Temperaturniveau um ca. 120 Grad C angehoben werden. Auch jetzt bleiben noch alle Aktivitätsbarrieren intakt, so daß keine Spaltproduktfreisetzung in die Umgebung erfolgt.

7.4.2.3 Diskussion der Folgen eines hypothetischen Unfalles

Der Eintritt eines hypothetischen Unfalles mit einer völligen Zerstörung aller Spaltproduktbarrieren ist aufgrund der vorgesehenen redundanten und diversitären Kühlsysteme äußerst unwahrscheinlich. Postuliert man ihn zur Vervollständigung der Sicherheitsbetrachtungen dennoch, so kann man folgende Aussagen festhalten:

- Durch die stetige adiabate Aufheizung werden langfristig alle Spaltproduktbarrieren zerstört.
- Auf der Basis der bisher mit pessimistischen Annahmen durchgeführten Betrachtungen vergehen bis dahin beim frisch beladenen Lager mehr als 3 Monate.

Nach ca. 1100 h ungehinderter Aufheizung ist das gesamte eingelagerte Glasvolumen heißer als 900 Grad C (Bild 7-13), d.h. es hat den Erweichungspunkt überschritten. Bei Temperaturen oberhalb 700 Grad C tritt nach wenigen Tagen die Entglasung ein /7-8/; aus diesem Grunde sind ca. 650 h nach Aufheizungsbeginn alle Glasblöcke derart in ihrer Rückhaltefähigkeit geschädigt, daß sie nicht mehr als Spaltproduktbarriere fungieren können.

Der Edelstahlmantel des Glaskörpers wird einerseits als Folge des durch die Temperaturerhöhung steigenden Gasdrucks im Gasplenum und andererseits durch das Gewicht der übereinandergestapelten Glaskannen belastet. So erreicht der Edelstahlbehälter nach 1100-stündiger Aufheizung Temperaturen bis zu 900 Grad C bei einer Materialbeanspruchung von weniger als 20

N/mm². Diese Belastung führt zu einem Fließen des Mantelmaterials, woraus langfristig gesehen ein Überbrücken des Spaltes zwischen Glaskokille und Lagerschachtliner resultiert. Nach den bisherigen Erkenntnissen bleibt die Kokille aber intakt und die Maximaltemperaturen im Glas sinken bedingt durch den nun verschlossenen isolierenden Spalt.

Der Edelstahlliner des Lagerschachtes ist keinen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Es liegt daher auch kein Grund für sein Versagen vor Erreichen der Schmelztemperatur oberhalb 1200 Grad C nach mehr als 1500 h vor.

Die Schäden am Stahlgußbehälter betreffen im wesentlichen die axialen Spannglieder, die die Scheiben des Behälters gegeneinander verspannen. Sie gelangen bereits 300 h nach Aufheizungsbeginn in den Kriechbereich und bauen dadurch ihre Vorspannung ab. Dieses Verhalten führt aber keinesfalls zum Versagen der Spaltproduktbarriere "Stahlgußbehälter", da die Scheiben aufgrund ihres Eigengewichtes und ihrer konstruktiven Gestaltung in ihrer Lage fixiert sind und bleiben. Ein Versagen des Stahlgußbehälters kann bis zum Erreichen von Temperaturen um 800 Grad C ausgeschlossen werden; diese Marke wird frühestens nach ca. 1000 h überschritten.

Der Beton auf der Innenseite des Schutzgebäudes ist bereits 100 h nach Beginn des Aufheizstörfalles Temperaturen oberhalb 200 Grad C ausgesetzt, wodurch die inneren Schichten einen Großteil ihrer Festigkeit einbüßen.

Somit bleibt auch im hypothetischen Unfall ein Zeitraum von ca. 1000 h, das sind 42 Tage, bevor es zu nennenswerten radioaktiven Freisetzungen ins Schutzgebäude kommt. Während dieses Zeitraumes könnten einfachste Maßnahmen ergriffen werden, die ein vollständiges Versagen aller Spaltproduktbarrieren verhindern.

Aufgrund des stetigen Abfalles der Wärmeleistung vergrößern sich diese Handlungszeiträume noch, bis sie nach ca. 40 Betriebsjahren unendlich lang werden.

8. KOSTENABSCHÄTZUNG FÜR DAS ÜBERGANGSLAGER

Sicherstellungslager, in die HAW-Glasblöcke eingelagert werden, sind z.Zt. in Deutschland noch nicht in Betrieb. Somit können die Kosten für derartige Lager nur auf Kostenschätzungen basieren.

8.1 DIE BETRIEBSKOSTEN

Für das beschriebene Übergangslager mit Wärmenutzung ist von folgenden Randbedingungen für ein 450-Glasblocklager auszugehen:

- **Energieverbrauch**
Während der Beladephase ist mit einem Energiebedarf für den Betrieb der Hilfs- und Nebensysteme, der Beladeeinrichtungen, der Wärmenutzungseinrichtungen und der Klimatisierung zu rechnen. Dieser Energiebedarf reduziert sich während der Lagerphase auf die für den Betrieb der Anlage (Wärmenutzung) notwendigen Hilfssysteme (Pumpen, Überwachungseinrichtungen) sowie die Klimatisierung.
- **Personalkosten**
Für die Beladephase ist eine Bedienungs- und Verwaltungsbelegschaft erforderlich. Die Anzahl der erforderlichen Personen richtet sich nach dem Standort, d.h. wird das Sicherstellungslager innerhalb einer WA betrieben, ist der Personenbedarf wesentlich geringer als bei einem unabhängigen Standort.
- **Sonstige Kosten**
Hierunter fallen die Kosten für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, Verbrauchsmaterialien und die anfallenden Betriebsabfälle. Bei den Betriebsabfällen wird vorausgesetzt, daß im Übergangslager mittelaktive Abfälle aus folgenden Bereichen anfallen:
 - mittelaktive Abfälle in Form von Filtermaterialien, da die Transportbehälter vor dem Entladen entlüftet und nach dem Entladen einer Innenreinigung unterzogen werden,
 - Filterkonzentrat aus der Waschwasseraufbereitung,
 - Konzentrat aus der Gebrauchswasserverdampfung,
 - feste Betriebsabfälle (Verbrauchsmaterialien).

8.2 DIE INVESTITIONSKOSTEN FÜR DAS ÜBERGANGSLAGER

Die direkten Investitionskosten werden im folgenden für die wesentlichen Bauteile des Übergangslagers zusammengestellt. Soweit noch keine Angebote kompetenter Firmen vorliegen, erfolgt eine Abschätzung anhand spezifischer Kosten, die aus der Kerntechnik bekannt sind. Die Tabelle 8-1 enthält eine Zusammenstellung der ermittelten direkten Investitionskosten sowie Angaben zu den verwendeten spezifischen Kosten.

Nr.	Komponente	Menge	spez. Kosten	Gesamtkosten (T DM)
1	Betongebäude	3900 m³	(Angebot)	5.500
2	Stahlgußbe- hälter	3500 t	(Angebot)	16.250 (13.500)
3	Strömungswände (Grauguß)	2600 t	2,00 DM/kg	5.200
4	Liner in Behäl- terbohrungen	30 Stück	(Angebot)	500
5	Leckkontroll- system		(Angebot)	34
6	Doppelrohre für die Kühlung	48 Stück	(Angebot)	500
7	Krananlage	1	geschätzt	300
8	Einrichtungen zur Wärme- nutzung		geschätzt	2.000
9	Sekundäranla- gengebäude		geschätzt	1.000
10	Notkühlung mit Wasser		(Angebot)	180
11	Beladeeinrich- tungen		geschätzt	2.000
	Zwischensumme			33.464 (30.714)
12	Meß-, Steuer- und Regelungs- technik	Pauschal 7,5% der Zwischensumme		2.536
13	Infrastruktur + Sicherheitsein- richtungen	geschätzt		7.000
	direkte Investitionskosten			43.000 T DM (40.000)

Tab.8-1: Zusammenstellung der direkten Investitionskosten zum Übergangslager; die Angaben in Klammern ergeben sich für einen Lagerbehälter in GGG 40

Es ergeben sich direkte Investitionskosten von 43 Mio DM für eine Anlage zur Aufnahme der gesamten jährlich anfallenden Glasmenge entsprechend einer Reaktorkapazität von 25.000 MW(el).

Die größten Anteile an den Gesamtkosten von 43 Mio DM haben der Stahlgußbehälter (16,25 Mio DM), das Betongebäude (5,5 Mio DM), die Meß-, Steuer- und Regelungstechnik (4,5 Mio DM) sowie die Infrastruktur- und Sicherheitseinrichtungen (7 Mio DM).

Durch die Wahl eines anderen metallischen Behälterwerkstoffes lassen sich die Investitionskosten um ca. 7% bei der Verwendung von Sphäroguß (Behälterkosten 13,5 Mio DM) und um ca. 10% bei der Verwendung von Grauguß senken.

Die Aufwendungen für die im Rahmen der Sicherheitsphilosophie gewählte Auskopplung der Nachzerfallswärme mittels eines Wasserkühlkreislaufer laufen sich auf ca. 3,2 Mio DM (Position 8 und 9).

Von den anbietenden Firmen wird für die Fertigung des Stahlgußbehälters eine Zeit von 2 bis 4 Jahren angegeben. Sie ist bestimmt durch die Kapazität der benötigten Karusseldrehbank mit großem Durchmesser. Da bei den Anbietern zur Zeit jeweils nur eine Karusseldrehbank vorhanden ist, bildet sie den Engpaß. Bei der Wahl von Sphäroguß als Behälterwerkstoff beträgt die Lieferzeit eines Behälters 18 Monate bzw. 1 Jahr bei Lieferung von mehreren Behältern. Das Betongebäude kann in ca. 1 Jahr errichtet werden, so daß zur Zeit die Bauzeit von Auftragsvergabe bis Inbetriebnahme mit maximal 5 Jahren anzusetzen ist. Durch eine Kapazitätserweiterung bei der Stahlgußbearbeitung ließe sich die Bauzeit des Behälters auf ca. 2 Jahre reduzieren, so daß man langfristig mit einer Gesamtbauzeit von 3 bis 4 Jahren rechnen könnte.

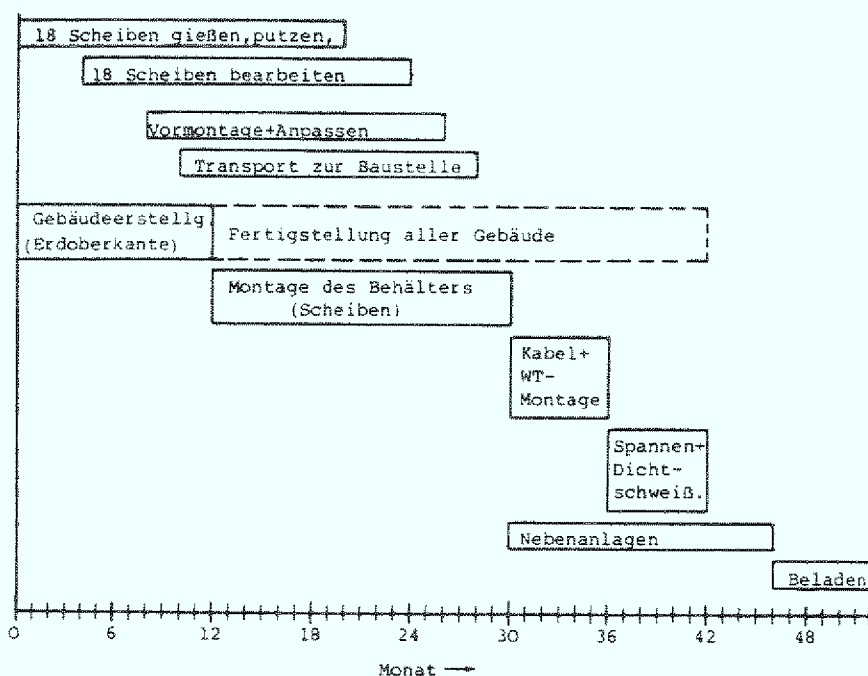


Bild 8-1: Bauablaufplan zur Errichtung eines Übergangslagers (Zur Fertigung stehen zwei Karusseldrehbänke zur Verfügung)

Bild 8-1 zeigt eine Übersicht über den Bauablauf, der sich aus technischen Angaben der Komponentenhersteller ableitet. Auf dieser Basis kann man die Investitionskosten für einen Stahlgußbehälter wie folgt kalkulieren:

- direkte Investitionskosten	43 Mio DM
- Engineering und Nebenkosten	8 Mio DM
- Versicherung und Zinsen während der Bauzeit	16 Mio DM
- Gesamte Investition	67 Mio DM

Um einen ersten Eindruck über die zusätzliche Belastung des nuklearen Brennstoffkreislaufs durch ein derartiges Lager für hochradioaktive Gläser zu gewinnen, wird folgende Betrachtung durchgeführt:

- Legt man diese Investitionskosten auf die im Jahre des Reaktorbetriebs erzeugte Elektrizität um (25.000 MW(el), 6.000 h/a), so ergibt sich eine Stromerzeugungskostenbelastung von weniger als 0,1 Dpf/kWh. Gemessen an den Stromerzeugungskosten neuer Leichtwasserreaktoren von ca. 11 Dpf/kWh /8-1/ fällt diese Belastung nicht ins Gewicht. Belastungsmindernd wirkt evtl. die Gutschrift für die abgegebene Heizwärme.

8.3 KOSTENBETRACHTUNG ZUR WÄRMENUTZUNG

Für eine Kostenbetrachtung ist es notwendig, die Abnehmer der erzeugten Wärme zu kennen. Als möglicher Nutzer könnte ein

- bestehendes Fernwärmenetz,
- eine Wiederaufarbeitungsanlage und
- ein Agrarbetrieb

auftreten.

8.3.1 ABNEHMER DER ERZEUGTEN NIEDERTEMPERATURWÄRME

Die erzeugte Niedertemperaturwärme (1 MW) kann von bestehenden Fernwärmenetzen mühelos aufgenommen und zur Deckung des Grundlastbedarfs eingesetzt werden. Je nach Jahreszeit und Fernwärmenetz schwankt die Vorlauftemperatur zwischen 110 Grad C und 170 Grad C. Hohe Vorlauftemperaturen (>150 Grad C) können bei den heutigen Glasblockdimensionen aufgrund höchstzulässiger Glastemperaturen im Übergangslager nicht erzeugt werden.

Ein weiterer Aspekt bei der Nutzung des Übergangslagers zur Bereitstellung von Fernwärme ist der wünschenswerte verbrauchernahe Standort des Erzeugers zur Reduzierung der Transportkosten. Dies gilt besonders bei Lieferungen kleiner Wärmemengen, wie im Falle eines einzelnen Übergangslagers. Dem geschilderten Nachteil kann man aber durch Einrichtung mehrerer Übergangslager am gleichen Standort begegnen.

Eine Möglichkeit für einen verbrauchernahen Standort wäre die Wiederaufarbeitungsanlage (WA). Der gesamte Frischdampfbedarf beträgt z.B. für die Wiederaufarbeitungsanlage Dragahn bzw. Wackersdorf 70 t/h.

In den Wärmetauschern, die in den Versorgungs- und Prozeßgebäuden der WA installiert sind, erfolgt die Umformung zu:

- Prozeßdampf für Heiz- und Förderzwecke (ca. 3 bar und ca. 6 bar),
- Dampf für die Luftbefeuchtung (ca. 3 bar),
- Heizwasser für Prozeß und Lüftung (zwischen ca. 60 Grad C und ca. 150 Grad C),
- Heizwasser für sanitäre Einrichtungen (ca. 60 Grad C) /8-2/.

Ein frisch beladenes Übergangslager könnte ca. 12 t/h Frischdampf zur Verfügung stellen.

Im Projekt Agrotherm /8-3, 8-4/ untersucht man die Nutzung von Kraftwerksabwärme für die Landwirtschaft. Hierzu leitet man Kühlwasser aus den Kraftwerkskondensatoren durch ein im Boden verlegtes Rohrsystem.

Um unabhängig vom Kraftwerksstandort zu werden, kann man die benötigte Niedertemperaturwärme (30 - 40 Grad C) auch durch das beschriebene Übergangslager bereitstellen.

Die Auswirkungen der Bodenerwärmung wurden z.B. bei Frühkartoffeln, Zuckerrüben, Soja, Körnermais, Wintergerste, Winterweizen und Graseinsaat in verschiedener Reihenfolge untersucht. Außerdem wurden Fragen der Sortenwahl, der Aussaatstärke, der Düngung, der Beregnung und des Pflanzenschutzes untersucht.

Erforscht wurde unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten der Einfluß einer Bodenerwärmung auf Verfrühung der Kulturen, Änderung der Fruchtfolge, Möglichkeiten des Anbaus subtropischer und tropischer Pflanzen, Auswirkungen der Überdeckung der Pflanzen mit Folien, Verbesserung von Ertrag und Qualität sowie Wachstum von Grünland.

Die verschiedenen landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Kulturpflanzen reagieren überwiegend positiv auf die Bodenerwärmung durch Ernteverfrühung, Qualitätsverbesserung und Ertragssteigerung. Beispiele: Ertragssteigerung bei Körnermais von 15 bis 55%, bei Zuckerrüben bis zu 70% Zuckermehrertrag. Die Ernte der Frühkartoffeln konnte bis zu 3 Wochen früher erfolgen. Manche Pflanzen, wie z.B. Luzerne, Welches Weidelgras oder Getreide reagierten zum Teil auch mit Mindererträgen auf eine höhere Bodenerwärmung.

Bedingt durch die klimatischen Verhältnisse in Mitteleuropa erfordert die Produktion von Gemüse und Blumen in Gewächshäusern einen hohen Bedarf an Energie. So mußte die deutsche Gartenbauindustrie 1972 im Mittel ca. 10,50 DM für 100 l leichtes Heizöl bezahlen, 1974 etwa 25,70 DM, 1978 etwa 26,70 DM und seit Mitte 1979 waren es rund 60 DM pro 100 l. Steigerungen gleicher Größenordnung liegen beim Erdgas vor.

Durch den Konkurrenzdruck südlicher Regionen (Israel, EG-Mitgliedsstaaten am Mittelmeer), wo fast ausschließlich die Sonneneinstrahlung zur Beheizung der Gewächshäuser ausreicht und die Konkurrenz des niederländischen Gartenbaus, dem derzeit Erdgas mit ca. 25 Cent/m³ (dies entspricht 25

DM/100 l leichtes Heizöl) zur Verfügung steht, ist die Entwicklung des deutschen Gartenbaus besonders problematisch geworden /8-5, 8-6/.

Den spezifische Wärmebedarf eines Quadratmeters Gewächsgrundfläche kann man nach DIN 4701 errechnen. Er berücksichtigt das Klima des Standortes, die Gewächshauskonstruktion und die geforderte Innentemperatur im Auslegungsfall. Als Richtwerte gelten für Einfach-Verglasung (EG) und Doppel-Verglasung (DG) (Tab. 8-2) /8-5/:

Gewächshaus- temperatur	EG	DG
t = 8 Grad C	$q' = 250 \text{ W/m}^2$	$q' = 160 \text{ W/m}^2$
t = 12 Grad C	$q' = 295 \text{ W/m}^2$	$q' = 190 \text{ W/m}^2$
t = 16 Grad C	$q' = 340 \text{ W/m}^2$	$q' = 220 \text{ W/m}^2$
t = 18 Grad C	$q' = 360 \text{ W/m}^2$	$q' = 235 \text{ W/m}^2$

Tab.8-2: Wärmebedarf eines Gewächshauses bei unterschiedlichen Gewächshaustemperaturen

Damit läßt sich die mögliche Gewächshausfläche, die mit der verfügbaren Wärme eines Übergangslagers von 900 kW zu beheizen ist, errechnen. Für eine Doppel-Verglasung und eine Innentemperatur von 18 bzw. 16 Grad C ergeben sich Gewächshausflächen von 3830 bzw. 4091 m², was der Größenordnung eines Vollerwerbsbetriebes entspricht. Durch das zur Verfügung stehende Temperaturniveau (90 - 60 Grad C) im Vorlauf ist der Einbau konventioneller Heizungssysteme möglich. Die Abkühlung des Heizwassers beträgt bei dieser Vorlauftemperatur ca. 20 - 15 Grad C.

Läßt man an den kältesten Tagen niedrigere Temperaturen zu oder bringt man durch eine Zusatzheizung die fehlende Wärme ein, so lassen sich größere Flächen durch ein Übergangslager beheizen. In einem so ausgelegten "Grundlastbereich" lassen sich durch das Übergangslager mehr als 50% der erforderlichen Wärme bereitstellen.

Die Kostensituation der Fischfangflotten wird durch weit entfernte Fischfanggebiete sowie durch den Aufwand für Mineralöl immer ungünstiger. Ebenso wie die Seefischversorgung ist auch der bundesdeutsche Süßwasserfischmarkt durch eine große Importabhängigkeit gekennzeichnet.

Im Großversuch Limnotherm /8-7, 8-8/ wird der Einfluß der Wassertemperatur auf das Wachstum verschiedener Fischarten untersucht. Das Ziel ist die kostengünstigste Erzeugung hochwertigen Fischeiweißes für die menschliche Ernährung in ausreichendem Maße.

Verglichen mit konventionellen Anlagen der Teichwirtschaft beträgt bei Limnotherm die Entwicklungszeit der Jungfische bis zum Verzehrgewicht bei Karpfen ein Viertel und bei Aalen ein Fünftel der Wachstumszeit, d.h. ein Karpfen wiegt in ca. 9 Monaten 9 Pfund (konventionell in 3 - 4 Jahren). Ein Vergleich der Produktionszahlen Limnotherm zu Teichwirtschaft ergibt einen Unterschied um den Faktor 10.000 (konventionell 150 kg Fisch/ha*a).

Für Limnotherm-Anlagen wird je nach Fischart eine Temperatur zwischen 22 und 35 Grad C benötigt, die zur Zeit durch Kraftwerksabwärme bereitge-

stellt wird. Mit Hilfe des Übergangslagers wäre es möglich, Gewässerflächen mit einer Oberfläche von ca. 2000 m² auf die erforderliche Temperatur einzustellen.

8.3.2 KOSTENBETRACHTUNG ZUR NIEDERTEMPERATURWÄRMENUTZUNG IN EINEM FERNWÄRMESYSTEM

Bei der Diskussion der Gutschrift der abzuführenden Nachzerfallswärme können unterschiedliche Betrachtungsweisen Berücksichtigung finden:

1. Die Anschaffungs-, Wartungs- und Betriebskosten der zusätzlich installierten Anlagen, sowie die notwendigen Rohrleitungssysteme Übergangslager/Fernwärmeverbraucher müssen mit der Gutschrift für die erzeugte Wärme verglichen werden.
2. Die notwendigen Rohrleitungssysteme zur Abfuhr der erzeugten Wärme müssen mit der Gutschrift verglichen werden, da die aktive Abfuhr der Nachzerfallswärme zur Sicherheitsphilosophie des Übergangslagers gehört, die anfallende Nachzerfallswärme aber auch durch Kühltürme abgeführt werden könnte.
3. Die Gutschrift für die erzeugte Wärme wird nicht mit den entstandenen Anlagen- und Rohrleitungskosten verglichen, denn durch die Abgabe der Wärme an ein Fernwärmenetz erhöht sich die Überwachungsbereitschaft und somit die Sicherheit des Lagerkonzeptes.

Würde man sich der Betrachtungsweise 1 anschließen, so wären die Kosten für die Anlageninvestitionen zur Wärmenutzung (5,6 Mio DM) und die notwendigen Kosten für das Rohrleitungssystem zur Anbindung des Übergangslagers an das Fernwärmenetz (10 Mio DM, 2000 DM/m) nicht durch den Gewinn aus einer Wärmenutzung zu decken.

Bei der Betrachtungsweise 2, hier wird nur das Rohrleitungssystem zur Anbindung des Übergangslagers an das Fernwärmenetz berücksichtigt, werden die zusätzlichen Kosten von 10 Mio DM durch die Wärmenutzung gedeckt (Bild 8-2). Die durchschnittliche Betriebsdauer für ein Fernwärmeleitungssystem wird mit 50 Jahren angenommen. Da die Wärmenutzungsdauer je Beladung 20 Jahre beträgt, werden die Investitionskosten für das Rohrleitungssystem pro Wärmenutzungsdauer mit 4 Mio DM angenommen. Weitere Angaben, die für die Amortisierungsuntersuchungen wesentlich sind, enthält Tabelle 8-3.

Legt man die Betrachtungsweise 3 zugrunde, ergibt sich in den ersten 20 Betriebsjahren ein Gewinn aus der Wärmenutzung von 5,4 Mio DM. Der Verbraucherpreis für die abgenommene Wärme wurde mit 15 DM/GJ angenommen. Aufgrund der im Übergangslager abfallenden Wärmeleistung sinken die Erträge aus dem Wärmeverkauf von

- 480.000 DM im 1. Betriebsjahr auf
- 240.000 DM im 10. Betriebsjahr und
- 195.000 DM im 20. Betriebsjahr ab.

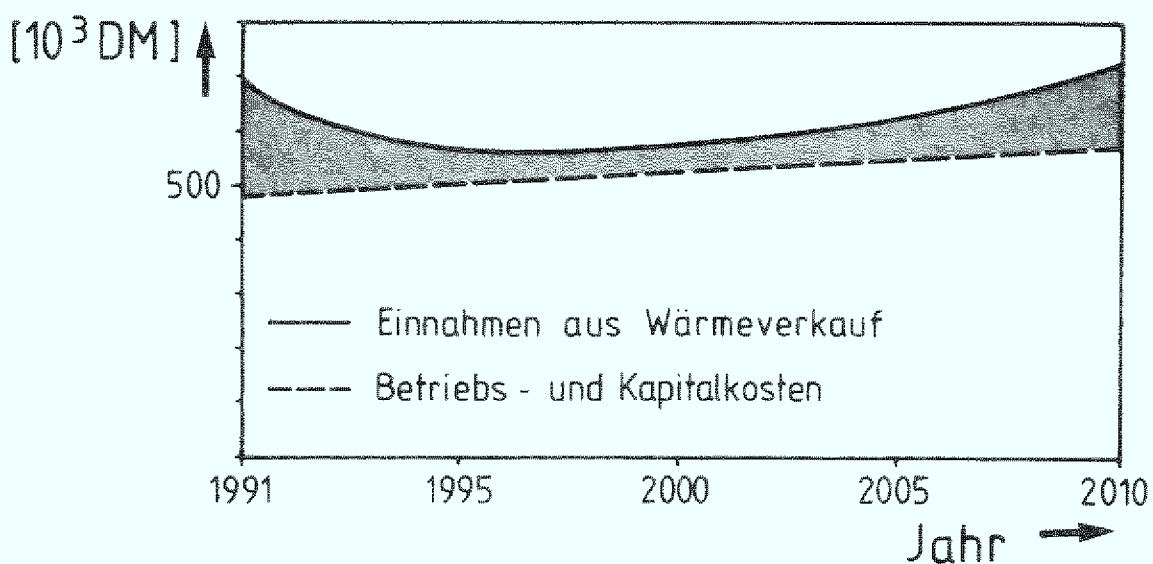


Bild 8-2: Darstellung der Aufwands- und Ertragssituation während einer 20-jährigen Wärmenutzung bei einem Übergangslager mit einer Anfangsleistung von 1000 kW

Nr.	Kriterium	Wert
1	Investitionskosten für das Fernwärmenetz (1983)	4 Mio DM
2	Abschreibungszeitraum	20 Jahre
3	Wartungs- und Bedienungskostenanteil bezogen auf die Anschaffung	1 %/a
4	angenommene Wärmekosten im Jahr 1983	15 DM/GJ
5	Preissteigerung - Wärmekosten - Sonstige	5 %/a 4 %/a
6	Zinssatz (auf Kapital)	5 %/a
7	1. Betriebsjahr	1991
8	Anfangswärmeleistung (7 a nach Reaktor-entnahme)	1 MW
9	Wärmenutzungsdauer je Beladung	20 a

Tab. 8-3: Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

9. EINLAGERUNG ALTERNATIVER STOFFE IN DAS ÜBERGANGSLAGER

9.1 DIE EINLAGERUNG VON ABGEBRANNTEN LWR-BRENNELEMENTEN

Durch die Möglichkeit der Brennelement- bzw. der Brennstabeinlagerung könnte das Übergangslager im Brennstoffkreislauf eine besondere Bedeutung gewinnen. Es wäre möglich, dieses Lager vor der Wiederaufarbeitung als "Zwischenlager" für Brennelemente zu benutzen und nach der Wiederaufarbeitung als "Sicherstellungslager" für Glaskokillen zu verwenden. Durch diese Doppelnutzung ergäbe sich eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Übergangslagers.

Für die Konditionierung von abgebrannten Brennelementen (BE) ist eine Vielzahl technischer Konzepte denkbar, z.B.:

- Verpacken ganzer Brennelemente
 - mit Kopf- und Fußteil
 - ohne Kopf- und Fußteil
- In Brennstäbe zerlegte Brennelemente
- Brennstäbe nach Abziehen der Spaltgase
- Verkürzte Brennstäbe
 - Brennstabstücke
 - aufgerollte Brennstäbe
 - gefaltete Brennstäbe.

Eine durchgeführte Nutzwertanalyse /9-5/ für die verschiedenen Konditionierungsmöglichkeiten und die dazugehörigen Verfahren ergab, daß die Einlagerung ganzer Brennstäben für das beschriebene Übergangslager den größten Gesamtnutzen besitzt.

Eine weitere Bewertung betraf die Einschlußrohre. Im Einschlußrohr werden zunächst mehrere Brennstäbe zusammengefaßt und gasdicht eingeschweißt. Diese Einschlußrohre werden wiederum in einer Trockenlagerbüchse gasdicht eingeschlossen.

Zur Bewertung lagen Einschlußrohre mit:

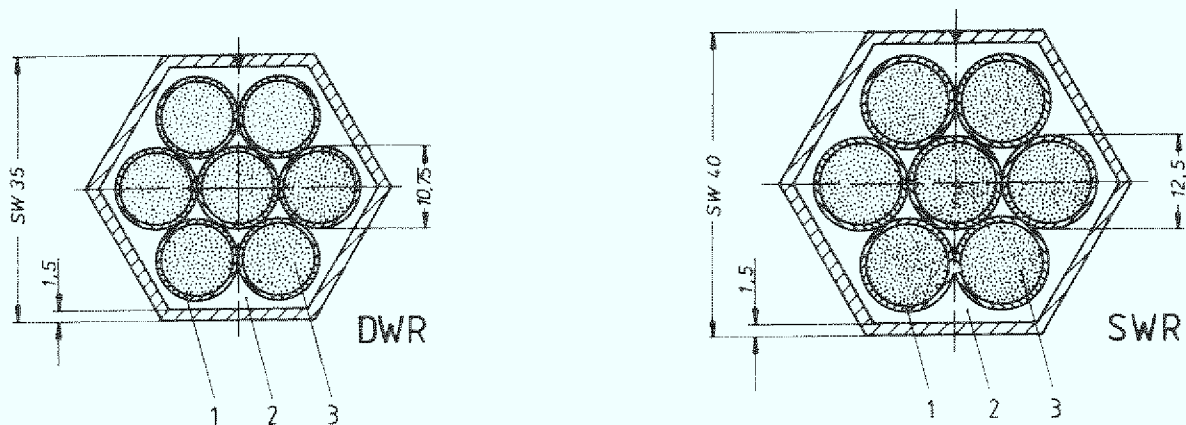
- Kreisquerschnitt,
- Dreiecksquerschnitt und
- Hexagonquerschnitt

vor.

Durch den gegebenen Kreisquerschnitt der Trockenlagerbüchse und die durchgeführte Nutzwertanalyse ergab sich für das Einschlußrohr mit hexagonalem Querschnitt die größte technische Wertigkeit.

9.1.1 DAS EINSCHLUßROHR

Es werden zunächst 7 Brennstäbe in einem Einschlußrohr zusammengefaßt. Der Sechskantquerschnitt des Einschlußrohres zeichnet sich durch seine hohe Packungsdichte aus. Sie beträgt für Druckwasserbrennstäbe ca. 50 % und für Siedewasserbrennstäbe ca. 51 % (Bild 9-1). Den Grundkörper des Einschlußrohres bildet ein Sechskantrohr, das an seinen Stirnseiten durch ein Kopf- und Fußteil gasdicht abgeschlossen wird. Bild 9-2 zeigt ein Hexagon-Einschlußrohr.



1. Brennstabhüllrohr
2. Inertgasatmosphäre
3. Brennstoff

Bild 9-1: Anordnung der Druck- und Siedewasserbrennstäbe im Einschlußrohr /9-5/

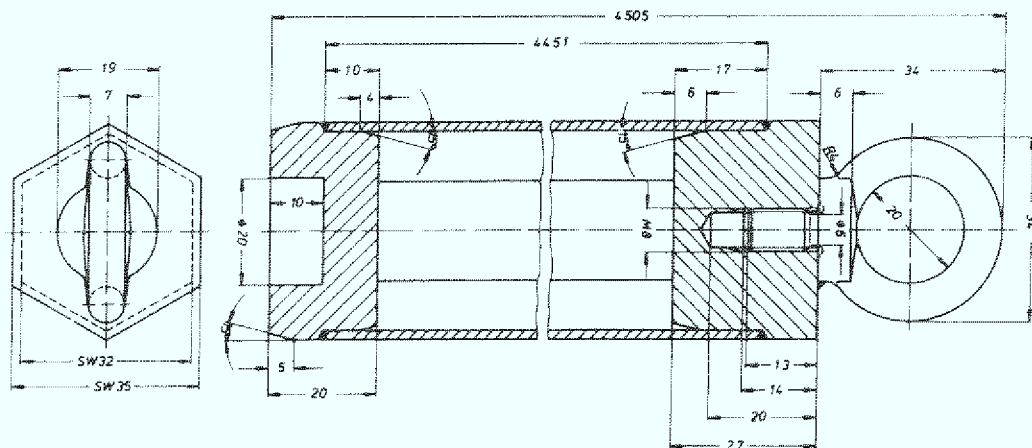


Bild 9-2: Hexagon-Einschlußrohr zur Aufnahme der Brennelemente /9-5/

9.1.2 DIE TROCKENLAGERBÜCHSE

Die Trockenlagerbüchse (Bild 9-3) setzt sich aus einem Grundkörper (Rohr) sowie einem Kopf- und Fußteil zusammen. Als Material für das Rohr wird ein hochlegierter ferritischer oder martensitischer Stahl (z.B. X 8 Cr Ti 17) verwendet, da dieser gegenüber austenitischen Stählen eine geringere Wärmeausdehnung besitzt. Bei entsprechender Auswahl der Fertigungsspiele pressen sich die aus austenitischen Stählen gefertigten Hexagon-Einschlußrohre und die Füll- und Führungsschienen bei Betriebstemperatur gegen die Trockenlagerbüchse und verbessern somit den Wärmeübergang.

Den gasdichten Abschluß gewährleisten in das Rohr eingeschweißte Fuß- und Kopfteile. Zur Handhabung der Trockenlagerbüchse durch Manipulatoren (Greifer) ist am Kopfteil der Trockenlagerbüchse ein Zapfen ausgearbeitet. Im Kopfteil befindet sich außerdem ein Anschluß zur Evakuierung und Befüllung der Trockenlagerbüchse mit Edelgas. Bild 9-4 zeigt die Anordnung der Einschlußrohre sowie der Füll- und Führungsschienen in der Trockenlagerbüchse.

9.1.3 THERMODYNAMISCHE BERECHNUNG

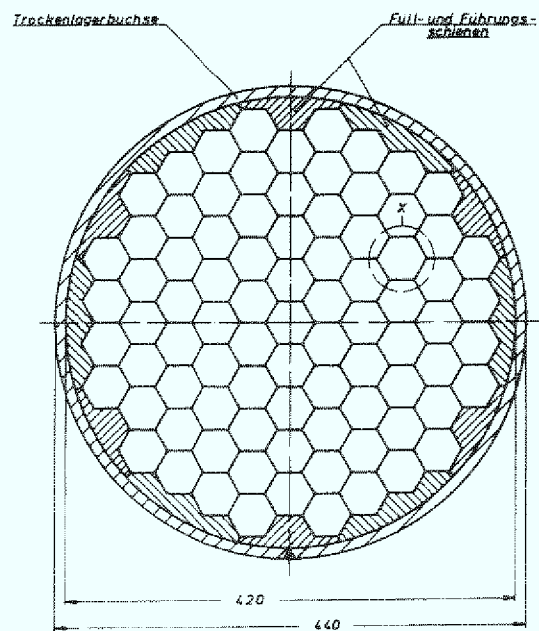
Die Berechnungen wurden für die Beladung des Übergangslagers mit Druckwasser-Brennelementen durchgeführt. Der zeitliche Verlauf der Nachzerfallswärme eines solchen Druckwasser-Brennelementes (Typ Biblis) ist in Bild 9-5 wiedergegeben.

In den 30 Lagerschächten des Lagerbehälters befinden sich je 4 Trockenlagerbüchsen, pro Trockenlagerbüchse 109 hexagonale Einschlußrohre mit je 7 Stäben. Das Übergangslager nimmt somit 91.560 Druckwasser-Brennelementstäbe auf, das entspricht 388 Druckwasser-Brennelementen. Hieraus resultiert eine Leistung von:

- 950 kW - 2 Jahre nach Reaktorentnahme -
- 600 kW - 3 Jahre nach Reaktorentnahme -
- 360 kW - 5 Jahre nach Reaktorentnahme -

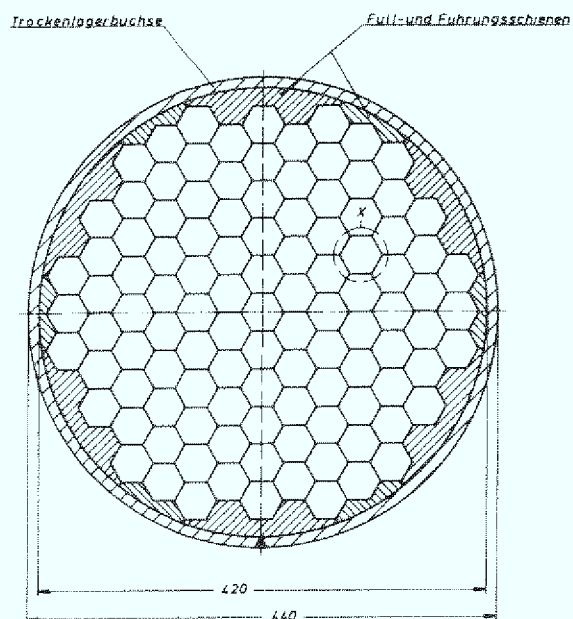
Bild 9-6 zeigt den Temperaturverlauf der äußeren Lagerbehälteroberfläche bzw. der Strömungswandoberfläche in Abhängigkeit von der Abklingzeit. Hierbei wurde nur Naturkonvektionskühlung zugrunde gelegt, da bei den geringen Nachzerfallswärmeleistungen eine Wärmenutzung nicht erforderlich ist.

Aus Bild 9-7 ist zu erkennen, daß bei der geforderten Hüllrohrtemperatur (kleiner 400 Grad C) eine Einlagerung der Brennelemente in das Übergangslager bereits 3 Jahre nach Reaktorentnahme erfolgen kann.



7 SWR-Stäbe pro Hexagon-Einschlußrohr
 85 Einschlußrohre pro Trockenlagerbüchse
 4 Trockenlagerbüchsen pro Lagerschacht
 30 Lagerschächte pro Behälter

Σ 71.400 SWR-Stäbe pro Lagerbehälter



7 DWR-Stäbe pro Hexagon-Einschlußrohr
 109 Einschlußrohre pro Trockenlagerbüchse
 4 Trockenlagerbüchsen pro Lagerschacht
 30 Lagerschächte pro Behälter

Σ 91.560 DWR-Stäbe pro Lagerbehälter

Bild 9-4: Anordnung der Einschlußrohre in der Trockenlagerbüchse /9-5/

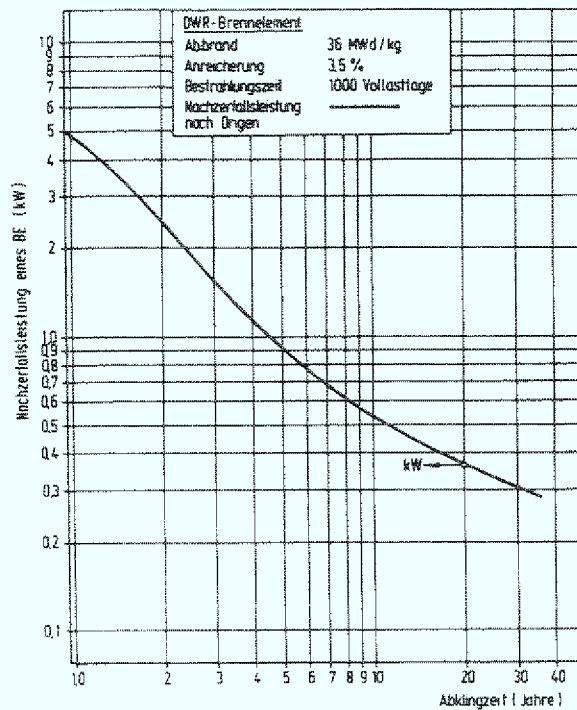


Bild 9-5: Nachzerfallsleistung für ein DWR-Brennelement /9-1/

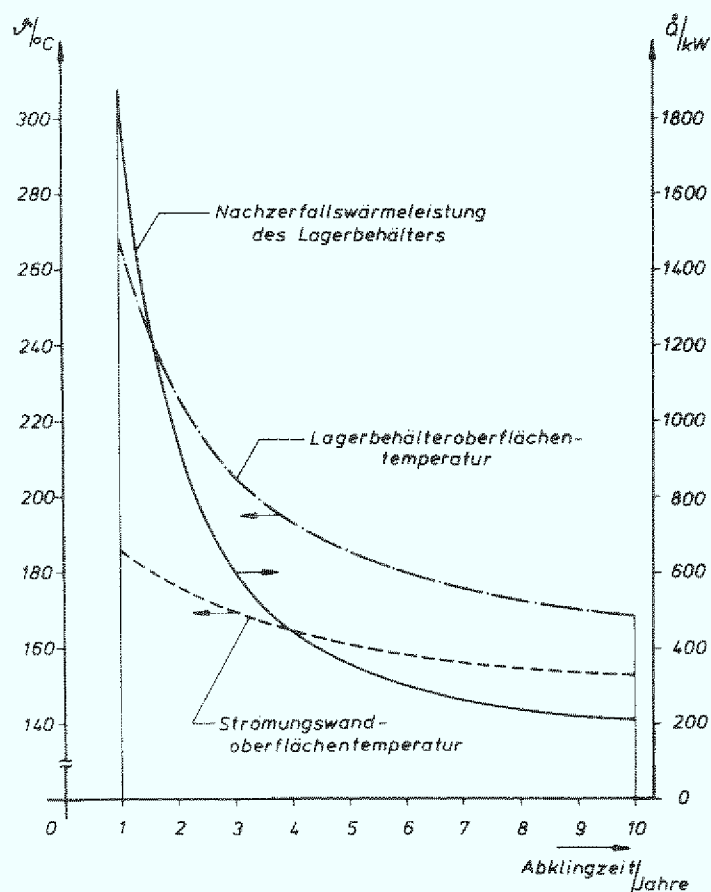


Bild 9-6: Temperaturverlauf der äußeren Lagerbehälteroberfläche bzw. der Strömungswandoberfläche sowie die Nachzerfallswärmeleistung des Lagerbehälters in Abhängigkeit von der Abklingzeit /9-5/

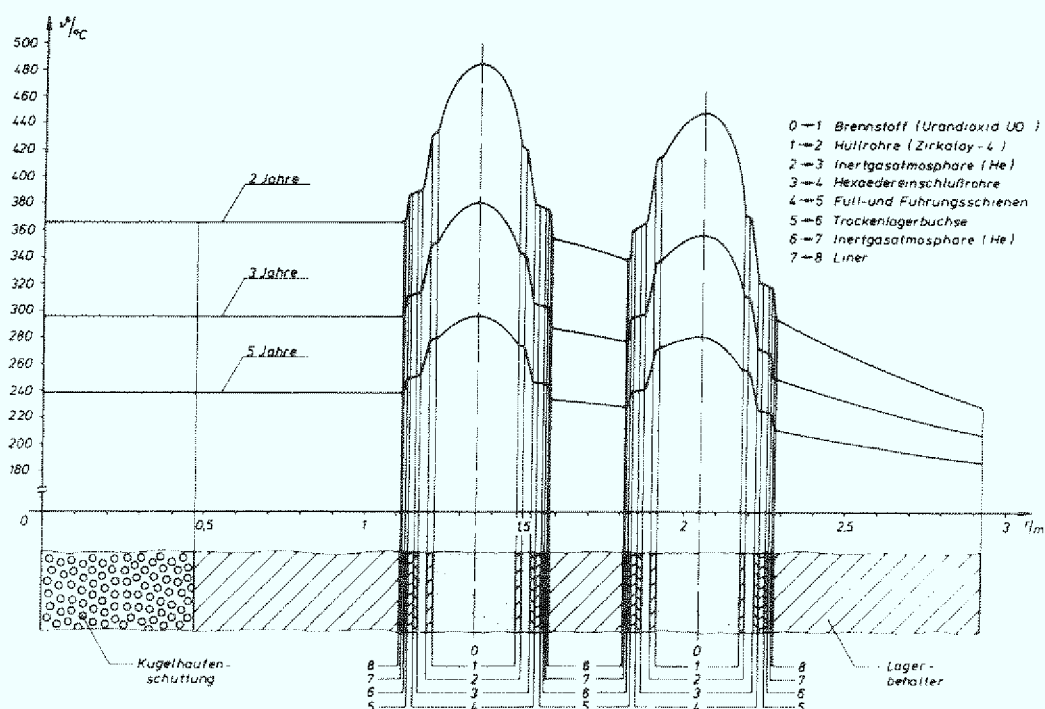


Bild 9-7: Radiales Temperaturprofil über den Lagerbehälter in Abhängigkeit von der Abklingzeit /9-5/

9.2 DIE EINLAGERUNG VON Brennelementkugeln AUS AVR UND THTR

Nach der Inbetriebnahme des THTR im Jahre 1985 fallen jährlich ca. 225.000 abgebrannte BE-Kugeln an. Nachwärmemessungen an einzelnen AVR-Brennelementen ergaben eine Nachwärmeleistung von ca. 150 mW je Brennelementkugel nach 150 Tagen /9-2/. Das Lagervolumen des Übergangslagers ermöglicht die Einlagerung von 462.200 Kugeln, wodurch bei gleichzeitiger und vollständiger Beladung des Übergangslagers eine Nachwärme von 69 kW abzuführen wäre. Bei der Einlagerung von THTR-Kugeln ins Übergangslager muß mit einer Nachwärmeleistung -pro Kugel 433 mW nach 200 Tagen- von 200 kW gerechnet werden.

Diese Zahlen verdeutlichen, daß das konzipierte Übergangslager für Glasblöcke (Nachwärmeleistung 1 MW) zur Einlagerung von Brennelementkugeln geeignet ist, aber für diese Anwendung aus thermodynamischen Gesichtspunkten überdimensioniert ist. Die Kosten je Kilowattstunde elektrischer Arbeit würden bei ca. 1,5 DPf liegen.

Bei Zugrundelegung einer Nachwärmeleistung von einem Megawatt und ohne Berücksichtigung der Temperaturverteilung über den Lagerquerschnitt wäre es möglich, einen Kreisringbehälter mit kritikalitätssichernden Einbauten zu konzipieren. Der Behälter hätte einen Innendurchmesser von 950 mm und eine Höhe von 20.000 mm bei einem Außendurchmesser von 5.900 mm (Wandstärke 200 mm). Es könnten somit ca. 2,5 Mio. THTR-Brennelementkugeln einge-

lagert werden. Die Kosten je Kilowattstunde (direkte Investitionskosten 30 Mio DM) beliefen sich dann auf ca. 1 DPf.

9.3 MÖGLICHKEITEN DER EINLAGERUNG VON KALZINAT

Bei der Verfestigung der über längere Zeit in Edelstahltanks gelagerten flüssigen Spaltproduktlösungen stellt die Verglasung das gegenwärtig einzig realistische Verfahren zur Isolierung der Radionuklide von der Umwelt dar. Dies geschieht auf der Grundlage der Kalzinierung und der anschließenden Verglasung des Kalzinats. Diese Verschmelzung von Kalzinat und Glasfritte ist gegenwärtig noch ein technisch komplizierter und störanfälliger Verfahrensschritt.

Die Kalzinierung beinhaltet das Austreiben flüchtiger Stoffe aus der salpetersauren Spaltproduktlösung (Salzlösung) durch Erhitzen, wobei Nitrate und/oder Metalloxide (Kalzinat) entstehen. Es wurden verschiedene Kalzinierungsverfahren entwickelt, deren Kalzinate, unabhängig von ihrer Herstellungsweise, nicht als endlagerfähiges Produkt gelten.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Kalzinats sind abhängig von der Abfallösung, dem Kalzinierungsverfahren und den Betriebsbedingungen. Es können entweder poröse, zellig-massive oder pulverförmige bis körnige Produkte entstehen. Körnige und pulverförmige Kalzinate sind leicht auslaugbar und besitzen eine geringere Wärmeleitfähigkeit als kompakte Kalzinate. Die Wärmeleitfähigkeit des Kalzinats ist in erster Linie eine Funktion der Porosität und dann erst von der jeweiligen Temperatur. Besonders zu beachten sind der Nitrat- und Wasserstoffgehalt der Kalzinate, wenn diese in geschlossenen Behältern gelagert werden. Aus den Nitraten bilden sich durch radiolytische Zersetzung Gase, die einen Überdruck erzeugen. In der Tabelle 9-1 sind einige Kenndaten von Kalzinaten wiedergegeben. Es wurden eine mengenmäßige Bestimmung des Kalzinates pro Tonne Schwermetall und die Berechnung der Nachzerfallswärmeleistung vorgenommen. Der Wiederaufarbeitungszeitpunkt liegt 7 Jahre nach Reaktorentnahme, da zu diesem Zeitpunkt die Nachzerfallswärme bereits stark abgeklungen und zum anderen die Verunreinigung durch kurzlebige Spaltprodukte abgenommen hat. Durch den Zerfall der kurzlebigen Spaltprodukte sinkt der Strahlungspegel in der Spaltproduktlösung und damit deren radiolytische Zersetzungswirkung in den Reagentien /9-6/.

Die ermittelten Werte betragen 45 kg Kalzinat pro t Schwermetall und 35,4 W pro kg Kalzinat. Die Wärmeleistung beträgt nach 10 Jahren 21,4 W/kg Kalzinat und 9 W/kg Kalzinat nach 50 Jahren.

Die Vorteile der Kalzinateinlagerung liegen in

- der Volumenreduktion des ins Übergangslager einzulagernden Wastes,
- den höheren zulässigen Zentraltemperaturen,
- der vorgenommenen technischen Weiterentwicklung während der Lagerzeit,
- der chemischen Weiterverarbeitung, z.B. zur Abtrennung bestimmter Elemente.

	Pot-Kalzinat	Wirbelbett-Kalzinat	Sprüh-Kalzinat	Drehrohren-Kalzinat	Walzen-Kalzinat
Produktform	zelliger Kuchen	kugelförmige Partikel	feinkörniges Puder	körniges Pulver	
Spaltprodukt-Oxide [Mol-%]	≤ 80	≤ 50	≤ 80	≤ 80	
Schüttdichte [g/cm ³]	1,0-1,4	0,8-1,7	0,2-1,0	0,6-1,0	
Korngröße [mm]	—	0,3-1,2	0,002-0,013	0,13-0,16	
Porosität [%]	50-80	45-75	65-95	70-80	
Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	0,3-0,5	0,15-0,25	0,07-0,1	0,1	
Nitratgehalt [Gew.-%]	0,05	4	0,05	0,05	6-7 Kristallwasser
Kalzinierungstemp. [°C]	850-900	400-500	300-800	300-700	130

Tabelle 9-1: Kenndaten für Kalzinatprodukte aus den verschiedenen Kalzinatverfahren /9-3/

9.3.1 DIE KALZINATEINLAGERUNGSELEMENTE

In der Arbeit /9-6/ werden fünf Einlagerungsformen für Kalzinat vorgestellt. Die Gegenüberstellung der thermodynamischen Daten ergibt, daß die geschweißten Kugeln und scheibenförmigen Elemente die günstigsten Eigenschaften aufweisen.

In diesem Abschnitt werden diese Einlagerungselemente vorgestellt und verglichen, sowie ihre Auswirkungen auf die thermodynamische und konstruktive Auslegung des Übergangslagers betrachtet.

Durch die kleinen Abmessungen sind die in Bild 9-8 dargestellten Lagerelemente für die Lagerung und anschließende Weiterentwicklung des Kalzinales gut geeignet.

Das Kalzinat wird mit einem geeigneten Bindemittel versetzt (ca. 20 %) und zu einer Kugel gepreßt. Durch das heiße Pressen erhält man eine Kalzinatdichte von 4 g/cm³. Nach Abzug des Bindemittels ergibt sich eine Einlagerung von 500 g Kalzinat pro Kugel. Für den Lagerzeitraum werden die Kugелеlemente in einen Behälter gefüllt, der in seinen Abmaßen dem COGEMA-Glasblockbehälter entspricht. Es können 85 kg Kalzinat in jeden Behälter eingelagert werden.

Bei dem Scheibenelement (Bild 9-9) werden Kalzinatbüchsen in durchbohrte Scheiben gedrückt. Ein COGEMA-Behälter faßt 18 Scheiben mit je 24 Büchsen. In jeder Büchse befinden sich 200 g Kalzinat (Dichte 2 g/cm³), somit ergibt sich für den Lagerbehälter ein Kalzinatgewicht von 86 kg.

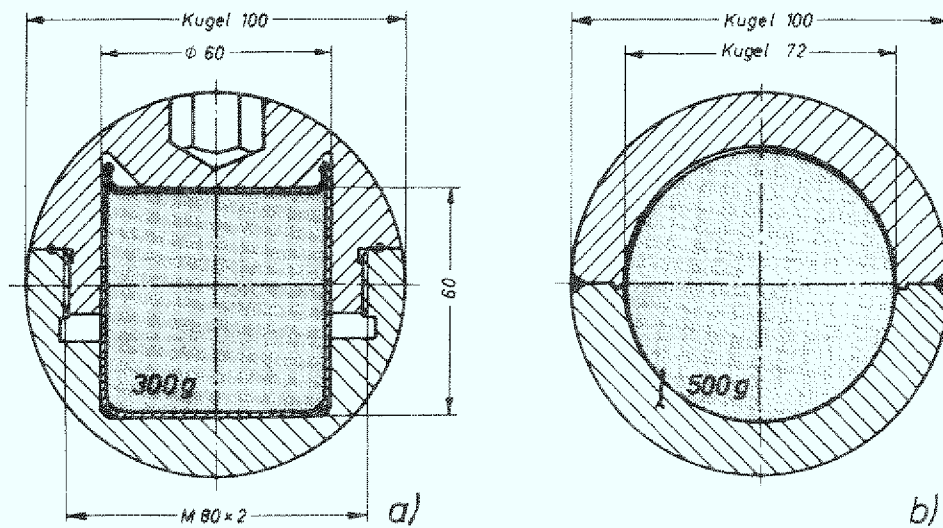


Bild 9-8: Kugelförmiges Lagerelement zur Aufnahme von Kalzinat /9-6/

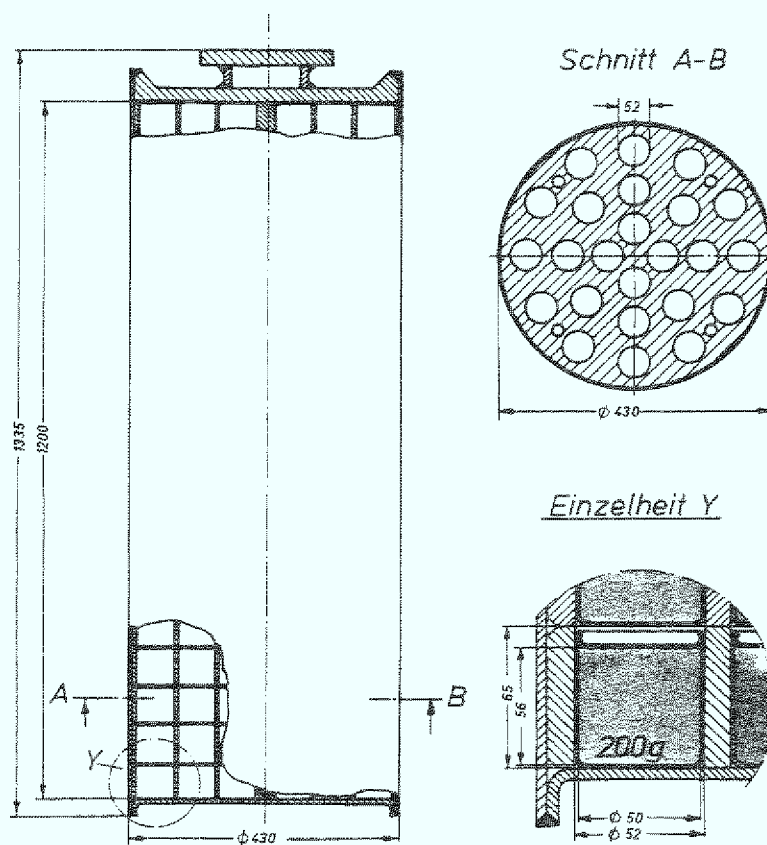


Bild 9-9: Scheibenförmiges Einlagerungselement für Büchsen mit Kalzinatfüllung /9-6/

Als Scheibenwerkstoff erweist sich Graphit wegen seiner hohen Temperaturbeständigkeit, seiner guten Wärmeleitfähigkeit und dem gegenüber Stahl sehr geringen Gewicht als geeigneter Werkstoff. Zur besseren Wärmeleitung sollte zwischen allen Teilen eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt werden.

Die beschriebenen Einlagerungselemente sind unter der Voraussetzung der Einhaltung der geometrischen Abmessungen des COGEMA-Behälters ausgelegt worden. In einer weiterführenden Arbeit /9-7/ wurde der thermodynamisch sinnvolle Durchmesser eines Lagerelementes in Abhängigkeit von der Wärmeleistung, dem Wärmeleitkoeffizienten des Kalzinates sowie von der zulässigen Zentraltemperatur (600 Grad C) ermittelt.

Unter Berücksichtigung weiterer thermodynamischer Randbedingungen (max. Lagerbehältertemperatur 220 Grad C, zulässige Temperaturdifferenz im Lagerelement ca. 340 Grad C) und unter Zugrundelegung von Drehrohrofen-Kalzinat (körniges Pulver, kontinuierlicher Verfahrensablauf, geringer Restnitratgehalt, Kalzinierungstemperatur 630 Grad C) ergibt die Nutzwertanalyse das im Bild 9-10 dargestellte Element. Die technischen Daten des wärmeerzeugenden Elementes sind in der Tabelle 9-2 wiedergegeben.

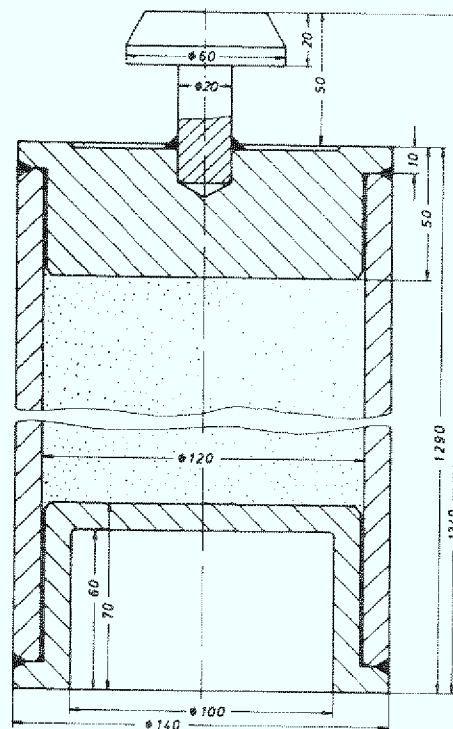


Bild 9-10: Wärmeerzeugendes Element (Kalzinatkanne) /9-7/

Material der Kanne	X 10 CrNiNb 18 9 Nr. 1.4550	
Außendurchmesser der Kanne	140	mm
Innendurchmesser der Kanne	120	mm
Höhe der Kanne	1.340	mm
Stapelhöhe	1.290	mm
Füllhöhe	1.170	mm
Kalzinatvolumen	13,23	dm ³
Dichte des Kalzicates	1,3	kg/dm ³
Kalzinatgewicht	17,2	kg
Gesamtgewicht	ca. 67	kg
Wärmeleistung	609	W
Aktivitätsgehalt	5,8	• 10 ¹⁵ Bq

Tabelle 9-2: Daten des wärmeerzeugenden Elementes bezogen auf die maximale Leistung des Übergangslagers /9-7/

9.3.2 THERMODYNAMISCHE BETRACHTUNG

Für die Kalzinatebinde mit kugel- und scheibenförmigen Einlagerungselementen ergeben sich aufgrund der gegenüber Glaselementen besseren Wärmeleiteigenschaften geringere Zentraltemperaturen. Auch können im Kalzinate Maximaltemperaturen bis 700 Grad C, je nach Kalzinierungsverfahren, toleriert werden.

Die Gegenüberstellung der Zentraltemperaturen kugel- und scheibenförmiger Elemente im Bild 9-11 zeigt, daß sich die Temperaturen der beiden Einlagerungsformen nicht wesentlich unterscheiden. Die Betriebsdaten der Kalzinatelemente sind in der Tabelle 9-3 bzw. im Bild 9-12 aufgeführt.

Beim Vergleich der Maximaltemperaturen in Kalzinatelementen und Glasblöcken zeigt sich, daß frisch beladene Kalzinatelemente geringere Zentraltemperaturen aufweisen, im Verlauf der Lagerung jedoch langsamer als Glasblöcke abkühlen. Dieser Effekt resultiert aus einer Maximalwertbetrachtung, die davon ausgeht, daß in beiden Elementen zwar die gleiche mittlere Leistungsdichte (20 W/l) eingehalten, bei den mit einer Toleranzbreite von 20 % eingelagerten Kalzinatekugeln jedoch die leistungsstärkste Kugel betrachtet wird.

Nutzt man die Vorteile der Kalzinatelemente mit höheren zulässigen Lagertemperaturen und besserer effektiver Wärmeleitfähigkeit, so könnte bereits eine Spaltprodukteinlagerung im 5. Jahr nach der Reaktorentnahme erfolgen. Die Wärmeleistung des Lagers wird damit auf 1.600 kW gesteigert; hierbei beträgt die Zentraltemperatur 480 Grad C /9-5/. Wie aber bereits dargelegt, wird es frühestens 7 Jahre nach Reaktorentnahme zu einer Wiederaufarbeitung kommen, die Nachwärmeleistung liegt dann bei ca. 1.100 kW.

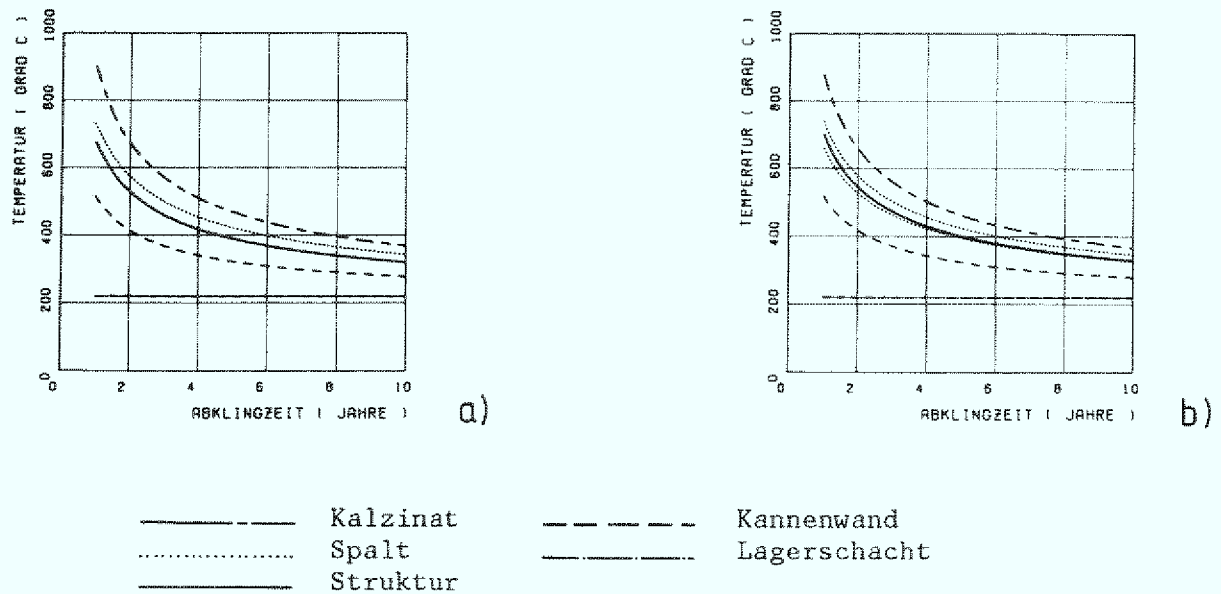


Bild 9-11: Gegenüberstellung von Zentraltemperaturen der verschiedenen Einlagerungsformen /9-6/
 a) verschweißte Kalzinatkugeln
 b) Kalzinatbüchsen in Graphitscheiben

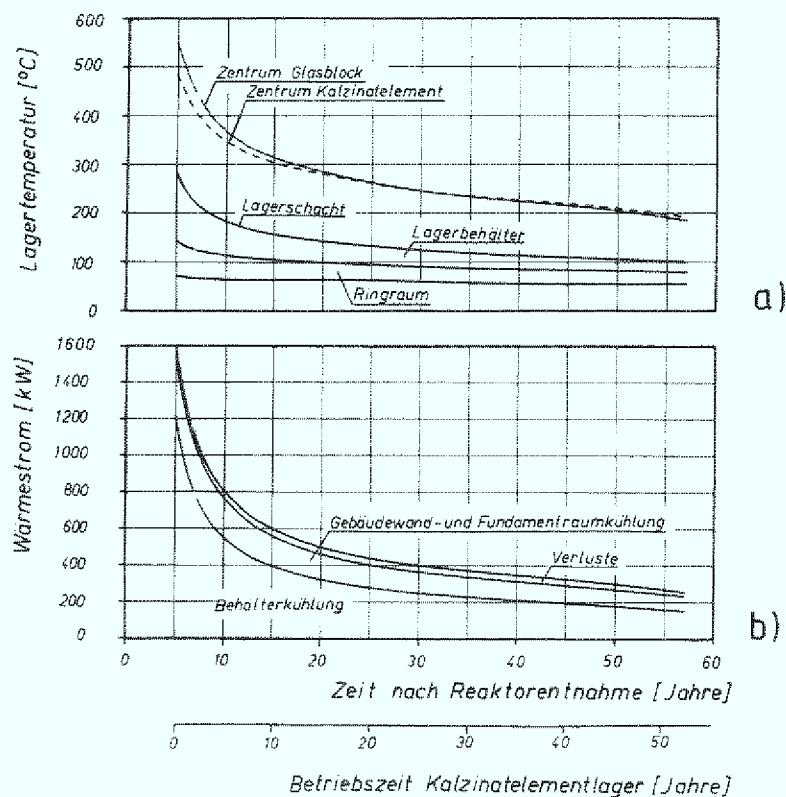


Bild 9-12: Kennlinien eines unter normalen Bedingungen arbeitenden Übergangslagers /9-6/
 a) Maximale Lagertemperaturen
 b) Wärmeleistung

Zeitpunkt	Nachwärmeleistung (kW)	Übergabetemp. Fernwärme (Grad C)	Wasserstrom Sekundärseite (kg/s)	Zentraltemp. Kalzinatelem. (Grad C)
BELADUNG	1.100	120	3*1,04	400
5. BETRIEBSJAHR	700	105	3*0,80	320
10. BETRIEBSJAHR	560	97,5	3*0,70	290
20. BETRIEBSJAHR	420	87,5	3*0,64	250
30. BETRIEBSJAHR	350	80,0	3*0,62	232
50. BETRIEBSJAHR	240	72,5	3*0,60	195

Tabelle 9-3: Betriebsdaten für einen Lagerzeitraum mit Wärmenutzung von 50 Jahren /9-6/

Mit dem in Bild 9-10 dargestellten Element, das einen Durchmesser von 140 mm hat, ist es möglich, in die vorgegebenen Lagerschächte (30 Schächte, 20.000 mm hoch, Durchmesser 430 mm) des Übergangslagers 3.150 wärmeerzeugende Elemente mit einer Gesamtleistung von 1,9 MW einzulagern.

In der bereits angesprochenen Arbeit /9-7/ ist der Aufbau (die Lochteilung der Scheiben) des Lagerbehälters geändert worden (Bild 9-13). Auf vier Teilkreisen befinden sich 135 Lagerschächte, die je 15 Elemente übereinandergestapelt aufnehmen können, in jedem Lagerbehälter befinden sich also 2.025 wärmeerzeugende Elemente. Die Wärmeleistung beträgt zum Einlagerungszeitpunkt 1,2 MW.

Durch diese Änderung und die angesprochenen Randbedingungen ergibt sich das folgende radiale Temperaturprofil (Bild 9-14), mit einer max. Zentraltemperatur im Kalzinat von 572 Grad C und einer max. Lagerwandtemperatur von 226 Grad C.

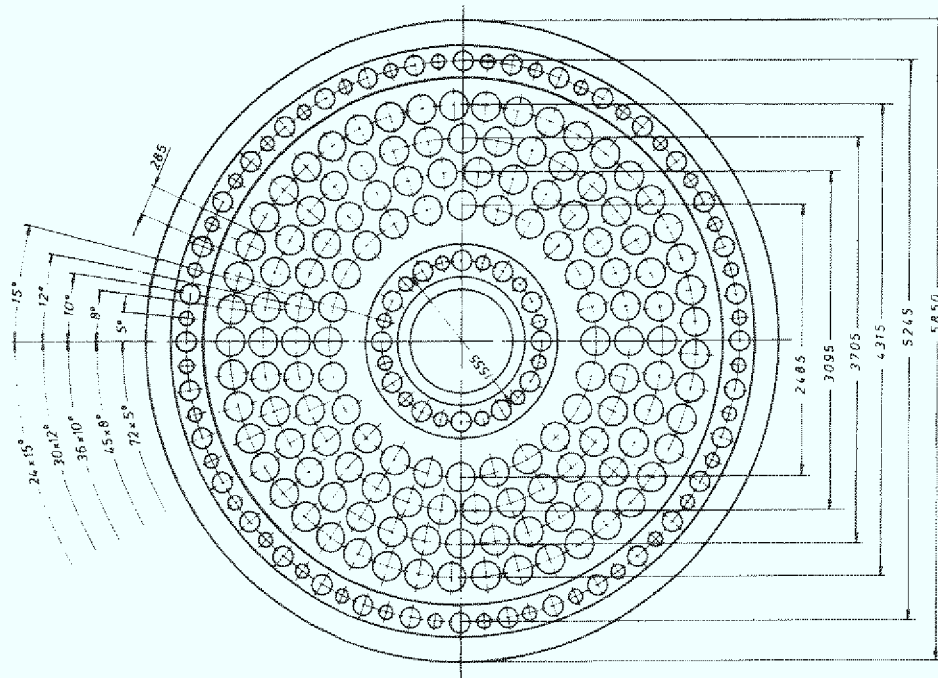


Bild 9-13: Lagerbehälter - Draufsicht /9-7/

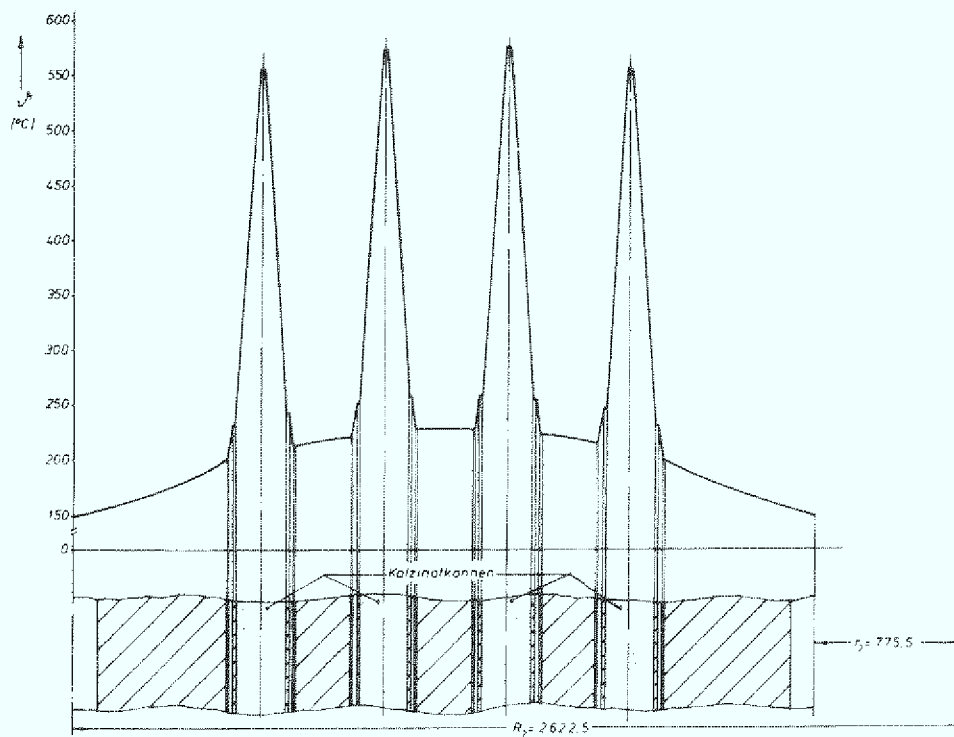


Bild 9-14: Radiales Temperaturprofil des Übergangslagers /9-7/

10. GEGENÜBERSTELLUNG KONKURRIERENDER HAW-LAGERKONZEPTE

In diesem Kapitel wird eine Gegenüberstellung der vorgestellten oberirdischen Lagerkonzepte (vgl. Kap. 3 und 4) zur Einlagerung von HAW Glasblöcken vorgenommen. Diese ermöglicht den direkten Vergleich der vorgestellten HAW-Lagerkonzepte, wodurch eine objektive Beurteilung möglich wird. Die Gegenüberstellung der untersuchten Lagerkonzepte erfolgt anhand von Tabellen, die eine Zusammenstellung der relevanten Daten unter unterschiedlichen Gesichtspunkten enthalten:

- **Technischer Aufbau:**
In dieser Tabelle sind alle wesentlichen Daten enthalten, die einen Überblick über das technische Konzept verschaffen, wie z.B. Kühlung, Kapazität, Gebäudeabmaße, Temperaturen, Strukturwerkstoffe.
- **Betriebsfragen:**
Hier sind Aussagen über den Betriebsablauf zusammengestellt, wie z.B. Beladeprinzip, Wiederholungsprüfung, Reparierbarkeit, Fehlerdetektion.
- **Sicherheitstechnik:**
Die zusammengestellten Daten geben Auskunft über den Schutz der Umgebung gegen radioaktive Belastungen. Besonders hervorzuheben sind die Spaltproduktbarrieren und deren Belastungen in Störfallsituationen.
- **Genehmigungsfragen:**
Diese Zusammenstellung soll Aufschluß über mögliche genehmigungstechnische Schwierigkeiten und/oder Auflagen geben.
- **Kosten:**
Anhand der Zusammenstellung wird verdeutlicht, welcher Investitions- und Betriebsaufwand für die einzelnen Lagerkonzepte anfällt. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die mögliche Errichtungszeit nach Erteilung des Bauauftrages.
- **Allgemeines:**
Die letzte Tabelle enthält Angaben, die für eine Beurteilung ebenfalls herangezogen werden sollten.

Alle Angaben basieren auf Veröffentlichungen sowie persönlichen Mitteilungen der Firmen.

Zwei Konzepte der Deutschen Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH (DWK) zur HAW-Lagerung konnten nicht in die Bewertung aufgenommen werden, da die Unterlagen nicht zur Verfügung standen. Es handelt sich dabei um ein Einkreis-Blocklager und ein Tunnellager. Das Einkreis-Blocklager ist in starker Anlehnung an das A.V.M.-Lager (Anhang A.1) in Marcoule entstanden. Dieses Lagerkonzept ist für die Wiederaufarbeitungsanlagen in Dragahn und Wackersdorf vorgesehen (Bild 10-1).

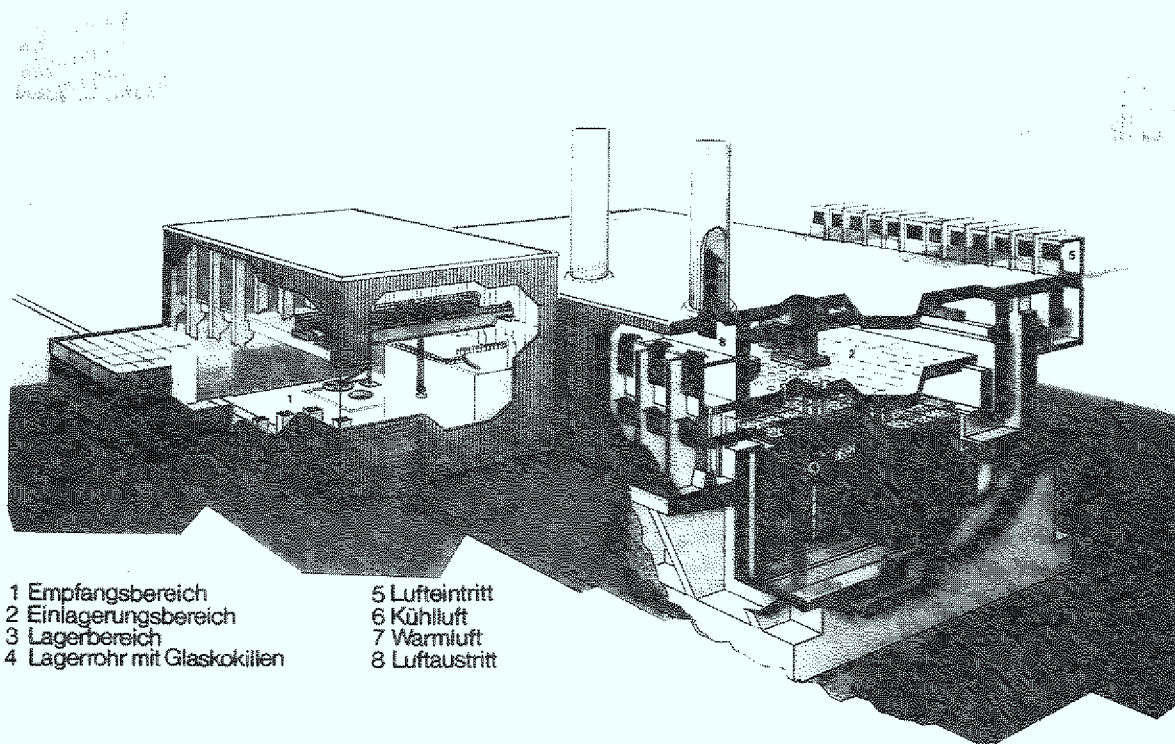


Bild 10-1: Perspektivische Darstellung des Glasblocklagers der DWK /10-1/

10.1 TECHNISCHE KONZEPTION

Die Tabelle 10-1 enthält die wesentlichen Daten zur Gegenüberstellung der technischen Lagerkonzeptionen. Die vorliegenden Konzepte gehen von unterschiedlichen Lagerkapazitäten aus (450 bis 25.800 Kokillen) (Zeile 6), die innerhalb dieser Betrachtungen an manchen Stellen einen direkten Vergleich unmöglich machen bzw. nur bedingt zulassen. Der konstruktive Aufbau der Sicherstellungslager umfaßt zwei mit getrennten Aufgaben betriebene Gebäudeteile:

- den Empfangsbereich und
- den Lagerbereich.

Der Empfangsbereich ist, bis auf Konzept 5, für alle Vorschläge ähnlich, da die HAW-Kokillen in Großtransportbehältern angeliefert werden und aus diesen zu entladen sind.

Mit Ausnahme der Konzepte 2 und 4 wurde die vertikale Einlagerung der Glasblöcke in die Lagerbereiche vorgesehen, woraus ein einfacherer Handhabungsablauf zwischen Entladung und Einlagerung resultiert. Beim KWU-Konzept (2) resultiert aus der horizontalen Einlagerung von oben in die Lagergestelle und der für jede Einlagerung notwendigen Öffnung in der Lagerraumdecke eine relativ komplizierte Belademaschine. Im BBC-Konzept (4) erfolgt die Einlagerung in die Lagergestelle zwar horizontal, hierzu

sind aber Wagen erforderlich, die durch eine Belademaschine von der Seite in die Lagerröhre hineingeschoben werden. Die restlichen Vorschläge sehen für die Einlagerung einen Kran vor, der die Kokillen von oben in die Lagerposition abläßt.

Bis auf Konzept 3 und 6 sehen alle Vorschläge im Normalbetrieb eine Kühlung der HAW-Kokillen durch einen oder mehrere hintereinandergeschaltete Naturzugkreisläufe vor. Auffallend ist, daß das NUKEM-Konzept (1) eine Naturzugkühlung ohne jede Strahlenabschirmung gegenüber der strömenden Umgebungsluft vorsieht. Dies führt dazu, daß Feststoffpartikel und Mikroorganismen mit der Umgebungsluft durch das Lager getragen werden (näheres hierzu in Kap. 3.1.3.2).

Die Lagerbereiche und Transportbehälter-Entladezonen sind als Vollschutzgebäude gegen äußere Einwirkungen ausgebildet, wodurch das äußere Erscheinungsbild als mittelhohe rechteckige Industriebauten geprägt ist. Das Konzept 6 unterscheidet sich hiervon wesentlich (Bild 4-3).

Als ein Indiz für die Zuverlässigkeit der Nachwärmeabfuhr können die Anzahl und die Art unabhängiger Kühlkreisläufe dienen (Zeile 13). Alle Lagerkonzepte verfügen über mindestens 2 • 100% installierter Wärmeabfuhrleistung. Das KWU-Konzept (2) und das BBC-Konzept (4) enthalten je zwei bau- gleiche Systeme auf Wärmerohrbasis, im Konzept 3 sind sogar drei identische Wärmekreisläufe parallel geschaltet. Lediglich Konzept 6 sieht drei redundante und diversitäre Wärmeabfuhrsysteme vor. Das erste System dient hier gleichzeitig der Wärmenutzung, wodurch sein Ausfall sofort am Ausbleiben der Abgabeleistung erkennbar wird.

Die Temperaturen der verwendeten Strukturwerkstoffe (Zeile 20) bewegen sich in technisch üblichen Bereichen. Lediglich im KWU-Konzept (2) sind im frischbeladenen Zustand Betontemperaturen bei Lagereinbauten und Schutzgebäude (EVA-Schutz) von 120 bzw. 100 Grad C vorgesehen, die für kerntechnische Anwendungsfälle ungewöhnlich hoch sind (näheres hierzu Kap. 3.2.3.2).

Parameter	Lagertyp	1. Einkreis-Block-lager der NUKEM	2. Zweikreis-Block-lager der KWU	3. Sicherstellungs-lager der BBC	4. Zweikreis-Trocken-lager der BBC	5. Behälterlager der Steng/GNS	6. Übergangslager der Universität Duisburg
1. Konstruktiver Aufbau		Eingangs- und Lagerbereich in Betonbauweise, vertikale Lagerung	Entladezelle mit angeschlossenen Lagerbereich, horizontale Lagerung	Eingangs-, Lager- und Versorgungsbereich in Betonbauweise, vertikale Lagerung	Verladebereich mit angeschlossenen Empfangs- und Lagerbereich, horizontale Lagerung	Halle mit Stellplätzen für Transportbehälter, vertikale Lagerung	Stahlguß-Großbehälter in Betongebäude, vertikale Lagerung
2. Art der betrieblichen Kühlung		Naturkonvektionskühlung der Kanne/Wand durch Umgebungsluft	Naturkonvektion innen und außen; Wärmetransport mit Wärmerohren durch Naturkonvektion	freie Luftkonvektion mit Rückkühlung über zweiten Kühlwasser-Kreislauf	Naturkonvektion innen und außen; Wärmetransport mit Wärmerohren	Naturkonvektionskühlung der Behälterwand durch Umgebungsluft, Wärmeleitung durch die Wand	Wasserkühlung des Lagerbehälters
3. Abwärmenutzung		nein	nein	möglich	nicht vorgesehen, im Prinzip auf niedrigem T-Niveau möglich	nein	ja
4. Schutz gegen äußere Einwirkungen		Lagermodul und Eingangsbereich als Vollschutz gegen EVA	Betongebäude als Vollschutz gegen EVA	Betongebäude und Sicherheitstechn. bedeutsame Systeme gegen EVA ausgel.	EVA-sichere Auslegung für Gebäude und Komponenten	Behälter nach Typ E(U) als EVA-Schutz	Gebäude und Unterflurbauweise bis Oberkante Lagerbehälter
5. Art des Lagerguts		Kannen vom Typ COGEHA Borosilikatglas	Kannen vom Typ COGEHA Borosilikatglas	Kannen vom Typ COGEHA Borosilikatglas	Kannen vom Typ COGEHA Borosilikatglas	Kannen vom Typ COGEHA Borosilikatglas	Kannen vom Typ COGEHA Borosilikatglas
6. Kapazität * vorliegender Entwurf * Extrapolierbarkeit		6 Module mit je 4300 Kannen beliebig erweiterbar durch Modulbauweise	2 Module mit je 2500 Kannen beliebig erweiterbar durch Modulbauweise	2500 bedingt erweiterbar	Module mit 2500 Kannen erweiterbar durch Modulbauweise je 2500 Kannen	21 COGEHA-Kannen * 240 (Plätze) = 5040 beliebig erweiterbar Ausbau der Lagerhalle	450 Kannen beliebig erweiterbar durch Modulbauweise
7. Gebäudeaufbau (L * B * H) (m) * Eingangsbereich * Lagerbereich		ca. 65 * 15 * 20 34 * 28 * 22	53 * 24 * 30 34 * 24 * 30	ca. 31 * 37 * 42 32 * 37 * 42	ca. 50,0 * 24,6 * 19,8 42,8 * 24,6 * 19,8	22 * 38 * 20 92 * 38 * 20	D = 15; H = 45
8. Art der Gebäudeanordnung		19 m über der Erdoberfläche, zentr. Anlieferung, rechteckförmig	27 m über der Erdoberfläche, zentr. Anlieferung, rechteckförmig	29 m über der Erdoberfläche, kastenförmig	20 m über der Erdoberfläche, zentrale Anlieferung, rechteckförmig	vollständig über der Erdoberfläche, Lagerhalle	Unterflur bis Behälteroberkante, 22 m über Erdoberfläche, zylindrisch
9. Flächenbedarf (m²) * Eingangsbereich * Lagerbereich		800 6 * 950	1300 2 * 800	1430 1200	ca. 1310 ca. 1053	850 3500	300 (geschätzt) 320
10. Umbauter Raum (m³) * Eingangsbereich * Lagerbereich		15500 6 * 23000	30000 2 * 22000	47500 50000	23450 20800	17000 70000	3000 (geschätzt) 9400
11. spez. Volumina (m³/Kanne) * gesamt * Lager		9 5	21 9	39 20	16,7 7,8	17 14	28 21
12. Temperaturen (°C) im * internen Kreislauf (Ein/Aus) * externen Kreislauf (Ein/Aus)		----- 27 / 104	70 / 120 30 / 60	/ 60 / 70	35 / 70 30 / 64	----- 35 / 50	145 / 150 -----
13. Anzahl unabhängiger Kühlkreisläufe		1 (2 * 100% vermascht)	2 * 100% für EVA, sonst Redundanz 1500 von 3000	3 * 100% Sekundärkreis mit Wasser	2 * 100% Wärmerohrbatterien	1	3
14. Anordnung der Elemente im Lager		3 Kannen im Lager-schacht übereinandergestapelt, hexagonale Schachtanordnung	horizontal mit Abstandhalten, gestapelt in Führungsschienen	3 Kannen im Lager-schacht übereinandergestapelt, in 4 Lager-becken	horizontal auf Platten in Führungsschienen	vertikal, 21 Kannen, 7 auf der Grundfläche 3 übereinander	vertikal, 15 Kannen je Lager-schacht
15. Abmessungen der Elemente (mm)		D = 430; H = 1335	D = 430; H = 1335	D = 430; H = 1335	D = 430; H = 1335	D = 430; H = 1335	D = 430; H = 1335
16. Spezifische Beladung mit HAW-Oxiden (Gew.-%)		16	12,8	COGEHA-Spezifikation	COGEHA-Spezifikation	12,8	12,8
17. Leistungsdichte im Element (kW/m³)		17	12	10	13,3	15	15
18. Wärme-Fluß durch die Kanne/Wand (kW/m²)		1,4	1,0	1	1,17	1,3	1,3
19. Strukturwerkstoffe * Lagerzelle/-behälter * umgebendes Gebäude		Beton Stahlbeton + Liner innen	Beton + Stahl bewehrter Beton	Beton + Stahl Stahlbeton	Beton + Stahl Stahlbeton	Sphäroguß (GGG-40) Beton	Stahlguß G5-C25 bewehrter Beton
20. Temperatur der Strukturwerkstoffe (Ein-/Austritt) (°C) * Lagerzelle/-behälter/-schacht * umgebendes Gebäude		140 / 226 35 / 80	75 / 120 40 / 100	max. 90 max. 70	35 / 70 max. 70	35 / 100 (für BE) 35 / 50 (für EE)	kleiner 200 kleiner 90
21. Temperatur (°C) * Glasblock * Canning		402 273	370 240	siehe Tab. 5-13	siehe Tab. 5-13	keine Angaben	380 260
22. Überwachungssystem		Dosisleistung in Räumen Personenüberwachung Fortluftüberwachung	Aktivität der Abluft der Unterdruckhaltung, Gastemperatur innen	Temperatur- und Aktivitätsmessungen in Lagerbecken-Raumluft und Kühlwasser	Aktivität der Abluft, Lufttemperatur innen	Druckmessung zur Dichtigkeitprüfung des Deckelsystems	Temperaturen, Leckkontrollen des Deckelsystems und der Lagerschichten
23. Energiebedarf für den Betrieb		550 kW	4 * 106 kWh/a incl. Nebenanlagen und Objektsicherung	max. 20 MW (10 MW Elektrohilfskessel)	keine Angaben	für Objektschutz	z. Zt. nicht bekannt, Hauptverbraucher Wärmenutzung u. Objektschutz
24. Extrapolationsmöglichkeit		gegeben durch Modulbauweise	weitere Module anschließen bei gleicher Wechsellaschine und gleichen Sekundäranlagen	Blockweise gegeben	weitere Module anschließen 2 * 2500 Kokillen	durch Anbau weiterer Stellplätze	gegeben durch Zubau weiterer Lagergebäude bei gleichen Sekundäranlagen
25. Zahl und Art der Barrieren gegen Aktivitätsaustritt		1. Glasblock 2. Edelstahlmantel	1. Glas 2. Edelstahlmantel 3. Wärmerohre/Betonwand	1. Glasblock 2. Edelstahlmantel 3. Lagerbecken 4. Lagerbereich	1. Glas 2. Edelstahlmantel 3. Wärmerohre/Betonwand	1. Glas 2. Edelstahlmantel 3. Lagerbehälterwand	1. Glas 2. Edelstahlmantel 3. Linerrohr 4. Wärmetauscherrohr 5. Sekundärwärmetauscher
26. Wärmeleistung * Kanne (kW) * Lager (MW)		2,5 11	1,8 4,5	2 5	2 5	2,3 20	2,25 1

Tab.10-1: Zusammenstellung der Daten zur Beschreibung der technischen Lagerkonzepte (Firmenangaben)

	Parameter	Lagertyp	1. Einkreis-Block-lager der NUKEM	2. Zweikreis-Block-lager der K
1.	Konstruktiver Aufbau		Eingangs- und Lagerbereich in Betonbauweise, vertikale Lagerung	Entladezelle mit geschlossenem Lagerbereich, horizontale Lagerung
2.	Art der betrieblichen Kühlung		Naturkonvektionskühlung der Kanne wand durch Umgebungsluft	Naturkonvektion und außen; Wärmerohr mit Wärmerohr durch Naturkonvektion
3.	Abwärmenutzung		nein	nein
4.	Schutz gegen äußere Einwirkungen		Lagermodul und Eingangsbereich als Vollschutz gegen EVA	Betongebäude als Schutz gegen EVA
5.	Art des Lagerguts		Kannen vom Typ COGEMA Borosilikatglas	Kannen vom Typ Borosilikatglas
6.	Kapazität * vorliegender Entwurf * Extrapolierbarkeit		5 Module mit je 4300 Kannen beliebig erweiterbar durch Modulbauweise	2 Module mit je 3000 Kannen beliebig erweiterbar durch Modulbauweise
7.	Gebäudeaufbau (L * B * H) (m) * Eingangsbereich * Lagerbereich		ca. 65 * 15 * 20 34 * 28 * 22	53 * 24 * 30 34 * 24 * 30
8.	Art der Gebäudeanordnung		19 m über der Endoberfläche, zentr. Anlieferung, rechteckförmig	27 m über der Endoberfläche, zentr. Anlieferung, rechteckförmig
9.	Flächenbedarf (m ²) * Eingangsbereich * Lagerbereich		800 6 * 950	1300 2 * 800
10.	Unbauter Raum (m ³) * Eingangsbereich * Lagerbereich		15500 6 * 23000	30000 2 * 22000
11.	spez. Volumina (m ³ /Kanne) * gesamt * Lager		9 5	21 9
12.	Temperaturen (°C) im * internen Kreislauf (Ein/Aus) * externen Kreislauf (Ein/Aus)		----- 27 / 104	70 / 120 30 / 60
13.	Anzahl unabhängiger Kühlkreisläufe		1 (2 * 100% vermascht)	2 * 100% für EV sonst Redundanz 1500 von 3000
14.	Anordnung der Elemente im Lager		3 Kannen im Lager-schacht übereinander gestapelt, hexagonale Schichtenanordnung	horizontal mit Haltern, gestapelt, Führungsschiene
15.	Abmessungen der Elemente (mm)		D = 430; H = 1335	D = 430; H = 1335
16.	Spezifische Beladung mit HAW-Oxiden (Gew.-%)		16	12,8
17.	Leistungsdichte im Element (kW/m ³)		17	12
18.	Wärme flux durch die Kanne wand (kW/m ²)		1,8	1,0
19.	Strukturwerkstoffe * Lagerzelle/-behälter * umgebendes Gebäude		Beton Stahlbeton + Liner innen	Beton + Stahl bewehrter Beton
20.	Temperatur der Strukturwerkstoffe (Ein-/Austritt) (°C) * Lagerzelle/-behälter/-schacht * umgebendes Gebäude		140 / 226 35 / 80	75 / 120 40 / 100
21.	Temperatur (°C) * Glasblock * Canning		402 273	370 240
22.	Überwachungssystem		Dosisleistung in Räumen Personenüberwachung Fertluftüberwachung	Aktivität der A der Unterdruckh Gastemperatur i
23.	Energiebedarf für den Betrieb		550 kW	4 * 10 ⁶ kWh/a i Nebenanlagen un Objektsicherung
24.	Extrapolationsmöglichkeit		gegeben durch Modulbauweise	weiter Module schließen bei g Wechselmaschine gleichen Sekund lagen
25.	Zahl und Art der Barrieren gegen Aktivitätsaustritt		1. Glasblock 2. Edelstahlmantel	1. Glas 2. Edelstahlmantel 3. Wärmerohr/E
26.	Wärmeleistung * Kanne (kW) * Lager (MW)		2,5 11	1,8 4,5

Tab.10-1: Zusammenstellung der Daten zur Besch: Lagerkonzepte (Firmenangaben)

10. Gegenüberstellung konkurrierender HAW-Lage

10.2 BETRIEB DER LAGER

Tabelle 10-8 enthält einige Angaben zum Betrieb der Lager. Aufgrund der Lagerkonzeptionen kann die Leckage einzelner Kokillen bei keinem Vorschlag mit vertretbarem Überwachungsaufwand detektiert werden. Die Konzepte 5 und 6 erlauben gegenüber allen anderen Vorschlägen aber eine getrennte Überwachung von Kannengruppen, wodurch ein Eingriff durch das Bedienungspersonal entweder zur Wiederherstellung der Dichtheit oder zur Entnahme der defekten Kokille möglich wird.

Bei den Konzepten 2, 3 und 4 bleibt die freigesetzte Aktivität aufgrund der Unterdruckhaltung im Schutzgebäude bzw. wird teilweise durch Abluftfilteranlagen ausgeschieden.

Eine radioaktive Freisetzung aus der Kokille führt im NUKEM-Konzept (1) wegen des direkten Umweltkontaktes zu einer sofortigen radioaktiven Freisetzung in die Umgebung. Diese Freisetzung kann auch nach ihrer Erkennung nicht unterbunden werden. Hierzu müßte die defekte Kokille detektiert und anschließend entladen werden.

Mit Ausnahme der Konzepte 5 und 6 bildet eine Detektion von radioaktiven Freisetzungen wegen der großen Luftinventare bzw. wegen des hohen Luftdurchsatzes (Konzept 1) erhebliche meßtechnische Schwierigkeiten /5-20/.

Die Konzepte 5 und 6 erlauben eine integrale Wiederholungsprüfung bzw. eine kontinuierliche Überwachung der Barrieren gegen Austritt von Radioaktivität. Durch Austausch bzw. Reparatur kann so ihre Funktionsfähigkeit sichergestellt werden.

Die erforderlichen Wartungsarbeiten (Zeile 7) erstrecken sich im wesentlichen auf die Beladeeinrichtungen und bei Konzept 2, 3 und 4 auch auf das Unterdrucksystem des Lagergebäudes. Im KWU (2)- und BBC-Konzept (4) ist es notwendig, die zur Wärmeabfuhr notwendigen Wärmerohre regelmäßig zu kontrollieren. Die Einrichtungen zur Wärmenutzung in den Konzepten 3 und 6 müssen ebenfalls einer laufenden Wartung unterzogen werden.

10.3 SICHERHEITSTECHNISCHE MERKMALE

Die in Tabelle 10-3 aufgeführten Merkmale zur Sicherheitstechnik sind für die Auswahl eines Lagerkonzeptes von entscheidender Bedeutung.

Die gesetzlich vorgeschriebene Obergrenze für die zulässigen Dosisbelastungen des Betriebspersonals und der Umwelt wird von den hier vorgestellten Konzepten unterschritten. Das NUKEM-Konzept (1) enthält jedoch, wie in Kap. 3.1 bereits ausführlich beschrieben, den Nachteil des direkten Umgebungskontaktes im Falle von Leckagen.

Die in Zeile 2 aufgeführten Spaltproduktbarrieren und deren thermische Belastung verdeutlicht, daß das NUKEM-Konzept (1) über nur zwei Barrieren verfügt. Das Borosilikatglas liegt im Normalbetrieb mit 402 Grad C relativ nahe an der Gewährleistungsgrenze des Herstellers von 450 Grad C. Zusätzlich ist die zweite Barriere, das Edelstahlcanning, kontinuierlich der Umgebungsluft auf gehobenem Temperaturniveau ausgesetzt (vgl. Kap. 5.1.3.1). Alle anderen Konzeptvorschläge verfügen im Normalbetrieb über mindestens eine zusätzliche, niedrig belastete Spaltproduktbarriere, wobei sich Konzept 6 mit 5 Barrieren, von denen die drei zuletzt genannten sehr niedrig belastet sind, aus den übrigen Vorschlägen hervorhebt. Für die vorgestellten BBC-Konzepte (3 und 4) kann keine Normalbetriebstemperatur genannt werden, da vom Anbieter bisher nur Störfalltemperaturen ermittelt wurden. Alle Anbieter garantieren aber eine Störfalltemperatur von weniger als 450 Grad C (siehe Zeile 2, 9 und 10). Hierbei muß aber der Handlungszeitraum, d.h. die Zeit bis zum Erreichen der Störfalltemperatur, mit in die Bewertung einbezogen werden. Auch ist in diesem Zusammenhang zu klären "was ist eine Barriere". Wenn z.B. der Glasblock und der Edelstahlmantel als Barriere nicht anerkannt werden, weil sie nicht wiederholungsprüfbar sind, so wäre das NUKEM-Lager in der vorgestellten Bauweise nicht genehmigungsfähig (vgl. hierzu auch Kap. 3).

Bei der Beurteilung der Wärmeabfuhrsysteme (Zeile 3) ist neben der Zahl und Art der Systeme als Bewertungsmaßstab ihre Verfügbarkeit bzw. die Möglichkeit ihrer ungewollten Stilllegung heranzuziehen. Es ist zu erkennen, daß die Konzepte 3 und 6 im Normalbetrieb als einzige aktive Kühlkreislaufkomponenten benötigen. Diese Tatsache vermindert die Verfügbarkeit der Wasserkühlung.

Da aber beim Übergangslager (6) die Wasserkühlung zur Nutzwärmeauskoppelung dient, würde ihr Versagen aufgrund des Ausbleibens des "Produktes Wärme" sofort die Aufmerksamkeit des Wartungspersonals bzw. des Abnehmers erregen, die ihrerseits Reparaturmaßnahmen einleiten würden. Bedingt durch das träge Temperaturverhalten verbleibt vom Zeitpunkt des Ausfalls bis zur Wiederherstellung irgendeiner Kühlung mindestens ein Zeitraum von 10 Tagen (vgl. Kap. 6.3 und 7.2.3). Ergänzend zur Wasserkühlung sind noch zwei weitere Kühlmaßnahmen vorgesehen. Nach dem Öffnen von Klappen in der Gebäudewand setzt eine inhärent sichere Naturzugkühlung (vgl. Kap. 7.2.1) des Lagers ein. Weiterhin besteht die Möglichkeit des Besprühens der heißen Behälteroberfläche mit Wasser (vgl. Kap. 7.2.2).

Das Konzept 3 gibt die Nachzerfallswärme durch einen inneren Naturzugkreislauf an einen redundanten Kühlwasserkreislauf ab, der sie wiederum an die Umgebung abgibt.

Die Konzepte 1 und 5 werden durch einen Naturkonvektionskreislauf gekühlt. Konzept 2 und 4 bedienen sich dreier hintereinandergeschalteter Naturkonvektionskreisläufe zur Wärmeabfuhr.

Der Schutz der Einrichtungen gegen Einwirkungen von außen und innen (Zeile 4, 5 und 6) wird nach Angaben der Hersteller durch die gewählte Konstruktion und Auslegung sichergestellt.

Das Problem der Korrosion (Zeile 13) ist bei den Konzeptvorschlägen 1, 2, 3 und 4 näher zu untersuchen, da dort die Edelstahlkokillen während mehrerer Jahrzehnte korrosiver Luft ausgesetzt sind (vgl. Kap. 3.1.3.1), wobei Konzept 1 aus den zuvor erwähnten Gründen eine Sonderstellung einnimmt. Die anderen Konzepte verfügen über ein geschlossenes Gebäude mit innerer Luftzirkulation, so daß sich hier Luftveränderungen in der Umgebung nur sehr stark verzögert durch Leckagen im Inneren bemerkbar machen. Zudem scheint nach Verbrauch der korrosiven Stoffe eine selbständige Neutralisierung der Luftatmosphäre möglich.

Ein Ansaugen explosionsfähiger Gemische (Zeile 17) ist bei Konzept 1 jederzeit und bei 6 nur in Störfällen, also während des Kühlbetriebes durch Naturkonvektion, möglich. Der gleichzeitige Ausfall des gesamten Kühlkreislaufs bei Konzept 6 und anschließender Naturzugkühlung und das Entstehen, Ansaugen und Zünden eines explosiven Gemisches scheinen aber unwahrscheinlich. Außerdem kann die Explosions- oder Detonationsdruckwelle nicht sofort die radioaktiven Produkte erreichen. Sie müßte zuerst den Stahlgußlagerbehälter überwinden. Dagegen muß im Falle einer Detonation beim NUKEM-Konzept (1) mit einer Zerstörung von Glaskokillen durch Zerplatzen an der Gebäudedecke und anschließendem Austrag der Spaltprodukte in die Umgebung gerechnet werden (vgl. hierzu auch Kap. 3.1.3.4, 7.1.1 und 7.1.1.2).

Parameter	Lagertyp	1. Einheits-Blick-Lager der NUKEM	2. Zweiteits-Blick-Lager der KKK	3. Sicherheitss-Blick-Lager der BNC	4. Zweiteits-Trocken-Lager der BNC	5. Behälterlager der Steng/GNS	6. Übergangslager der Universität Duisburg
1. radioaktive Belastung * des Betriebspersonals * der Umwelt (mrem/a)		< zul. Dosisleistung (3 Abschreibeklassen) < 10 am Zaun (Zaun 150 m vom Lager entfernt)	Erfahrungswerte bei BRT 25 TB mit 21 Kokillen/a Entladung 30 mrem/TB Restaktivität Intervention 20 mrem/TB < 30 am Zaun	unterhalb der Grenzen der StrichSV von Be- und Entladungsplan für das Lager	unterhalb der Grenzen der StrichSV	< 20 mrem/h an der Behälteroberfläche < 10 am Zaun	< zul. Dosisleistung (0,75 mrem/h am Außenrand Behälter) < 30 außerhalb des Gebäudes
2. Barrieren * Zahl * Art u. Temperatur (°C) (Normal-/Störfallbetrieb)		1. Glas 302/450 2. Canning 2713/320	1. Glas 370/450 2. Canning 240/330 3. Wärmehohle 91/120 Gebäude 120/150 Unterirdische Räume nicht unterströmt	1. Glas 370/450 2. Canning 240/330 3. Wärmehohle 91/120 Lagerbereich	1. Glas 370/450 2. Canning 240/330 3. Wärmehohle 91/120 Gebäude 120/150 Unterirdische Räume nicht unterströmt	1. Glas 370/450 2. Canning 240/330 3. Wärmehohle 91/120 Gebäude 120/150 Unterirdische Räume nicht unterströmt	1. Glas 380/450 2. Canning 240/330 3. Wärmehohle 91/120 Gebäude 120/150 Unterirdische Räume nicht unterströmt
3. Wärmeabfuhrsysteme * Art und Redundanz		Naturkonvektion mit Umgebungsluft	1. Interner und Externer Naturkonvektionskreislauf 2 x 100% für Flugzeug- und sonst 1500 von 3000 Wärmehohlen	1. Naturkonvektion im Lagerbecken mit Wärmehohlen 2 x 100% für Flugzeug- und sonst 1500 von 3000 Wärmehohlen	1. Interner und Externer Naturkonvektionskreislauf 2 x 100% Wärmehohle	1. Naturkonvektion mit Umgebungsluft	1. Wasserkühlung 2. Wärmehohle 3. Behälterprüfsystem
4. Schutz gegen äußere Einwirkungen		Vollschutz durch Betongebäude mit ca. 2 m Wanddicke	Vollschutz durch Betongebäude mit ca. 2 m Wanddicke	Vollschutz durch Betongebäude mit ca. 2 m Wanddicke	Vollschutz durch Betongebäude mit ca. 2 m Wanddicke	Stahlwand des Lagerbehälters Typ B(U) geprüft	Vollschutz durch Betongebäude (2 m Wanddicke) und Unterirdisiertheit
5. denkbare Störfälle von Innen		Absturz der Kanne während der Beladung	Absturz der Kanne während der Beladung	Absturz der Kanne während der Beladung	Absturz der Kanne während der Beladung	LTA stürzt ab, Kannen werden im Behälter gefangen	Absturz der Kanne während der Beladung
6. Schutz gegen innere Einwirkungen		Kran + Greifvorrichtung nach KTA ausgelegt	KTA-Regelung für Kran und Belademaschine	Kran + Greifvorrichtung nach KTA ausgelegt	Kran + Greifvorrichtung nach KTA ausgelegt	nicht erforderlich	Stahlgewächsel schützt Lagerbehälter und Wärmehohle, Kran nach KTA-Anforderungen
7. Möglichkeit der späteren Nachrüstung gegen gestiegene Anforderungen für äußere Einwirkungen		möglich	nicht vorgesehen	nicht vorgesehen	nicht vorgesehen	gegeben	schwierig, z.B. Erd-aufschiessung
8. Aufwand für die Nachrüstung		nicht unerheblich	—	abhäng. v. Anforderungen	abhäng. v. Anforderungen	sehr hoch	hoch
9. Störfalltemperaturen in den Barrieren (Barriere/Temperatur °C) * 50%-iger Ausfall der Kühlung		1. Glas/450 2. Edelstahlmantel/320	1. Glas/450 2. Edelstahlmantel/330 3. Wärmehohle/120 4. Beton Innenseite/150	1. Glas/450 2. Edelstahlmantel/330 3. Wärmehohle/120 4. Lagerbereich/470	1. Glas/450 2. Edelstahlmantel/330 3. Wärmehohle/120 4. Lagerbereich/470	1. Glas/450 2. Edelstahlmantel/320 3. Wärmehohle/300 4. Behälter/300	Naturkühlung 1. Glas/450 2. Edelstahlmantel/320 3. Wärmehohle/300 4. Behälter/300
10. Störfalltemperaturen im Glas * teilweiser Ausfall der Kühlung (Temperatur °C) * Ausfall des gesamten Wärmeabfuhrsystems (°C)		1. Zulufschicht entleert 2. nicht unterteilt gem. EVA-Definition	< 450 z.B. bei Flugzeugabsturz nach EVA-Definition	nicht möglich gem. EVA-Definition	nicht möglich gem. EVA-Definition	für BE unterteilt nicht unterteilt	50% Ausfall über 1000 bis < 500 < 810
11. Materialstandzeiten (>= 40 a)		Beton gegeben (< 50 °C)	wird im Rahmen des Objektschutzes ausgeführt (Sicherheitskategorie I)	gegen Sabotage ausgelegt	gegen Sabotage ausgelegt	keine, da Objektschutz	keine, da Objektschutz
12. Sabotagemöglichkeiten		keine Angaben	keine Angaben	gegen Sabotage ausgelegt	gegen Sabotage ausgelegt	nicht gegeben	Lagerschacht Heilmantel-Strahlenschutzbehälter
13. Korrosion einzelner Bauteile im Lagerbereich		keine Angaben	keine Angaben	durch Werkstoffwahl ausgeschlossen, sofern nicht austauschbar	durch geeignete Werkstoffwahl ausgeschlossen	keine	keine
14. Strahlenfelder durch Aktivierungsprodukte		keine Angaben	keine Angaben	Vorschriften nach KTA (Sicherheitskategorie I)	Vorschriften nach KTA (Sicherheitskategorie I)	keine	keine
15. mögliche Erdbebenstärken		standortspezifisch Auslegung nach KTA	standortspezifisch Auslegung nach KTA	standortneutral	standortneutral	keine Bedeutung für Behälter, nur für Verfüllungsgut	standortspezifische Auslegung nach KTA
16. Auswirkungen von Erdbeben		keine Auswirkungen auf die Glasokkiden beim Auslegungserdbeben	keine Auswirkungen auf die Glasokkiden beim Auslegungserdbeben	gegen Erbeben (GA, SE) ausgelegt	gegen Erbeben (GA, SE) ausgelegt	Behälter kippen um, Halle stürzt evtl. ein, Behälter verschüttet	keine Auswirkungen auf die Glasokkiden
17. Analysen explosionsfähiger Gase in das Lager		möglich, Lagergestellauslegung entsprechend ausführen	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich, Behälter gegen Druckwellen ausgelegt	bei Notkühlung möglich Lagerbehälter gegen Druckwellen ausgelegt
18. Möglichkeit der Blockade einzelner Wärmeabfuhrsysteme durch innerbetriebliche Störungen		nur durch Verstopfen von Luftzuführungskanälen (>65 m/Modul)	Ausfall der Wärmehohle von 3000 - Redundanz	Ausfall möglich, aber 3-fache Redundanz	Ausfall möglich, aber 3-fache Redundanz	nur sehr schwer möglich, da die Kinnströmungen sehr groß sind	nur schwer möglich, durch rechnerische Auslegung der Kinnströmungen und Strömungsquer-schnitte

Tab.10-3: Zusammenstellung der Daten zur Beschreibung der sicherheits-technischen Merkmale (Firmenangaben)
* Daten wurden nicht mitgeteilt