



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

**Experimentelle Untersuchungen zur
Eignung von Kanalsystemen für
Linerleckortung und Dränage
in einem Spannbetonbehälter**

von

M. Nickel

G. Breitbach

J. Altes

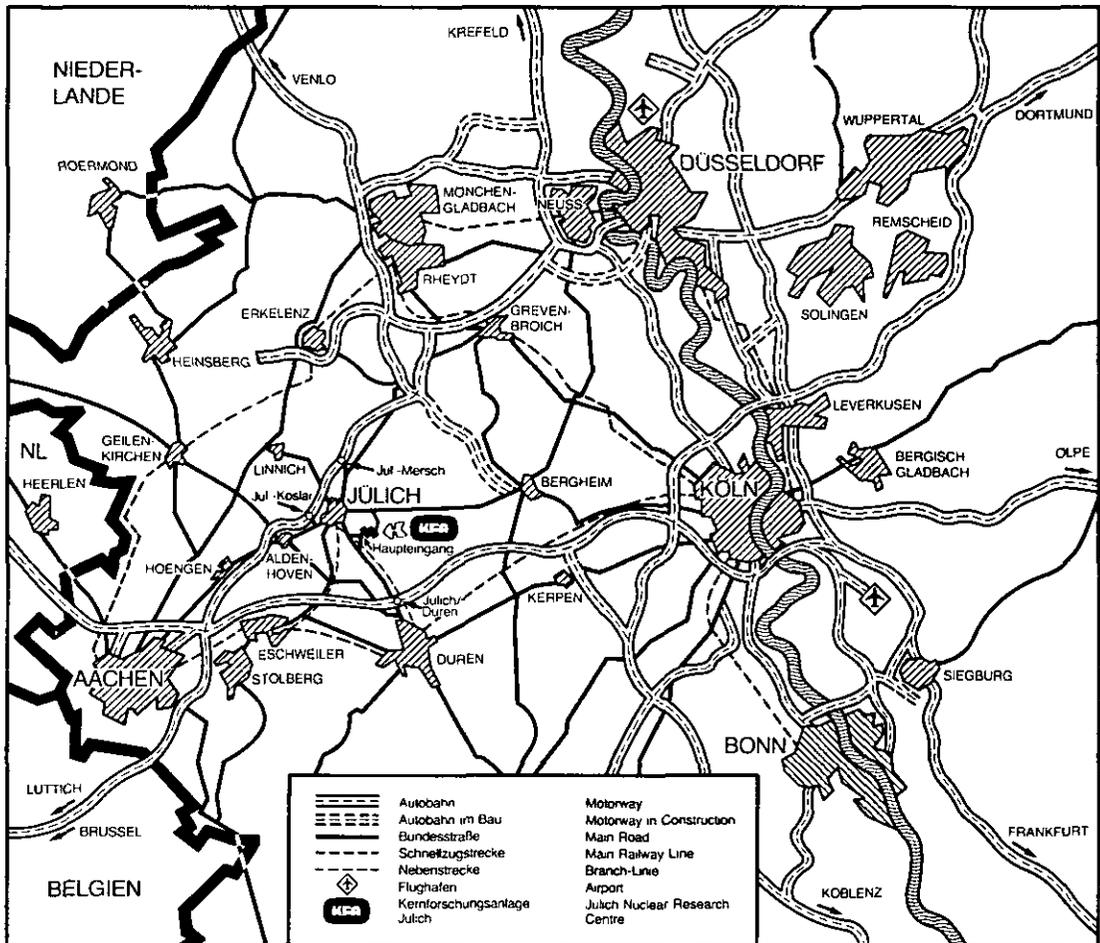
K. H. Escherich

J. Wolters

Jül - Spez - 299

Februar 1985

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 299

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül - Spez - 299

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Experimentelle Untersuchungen zur
Eignung von Kanalsystemen für
Linerleckortung und Drainage
in einem Spannbetonbehälter**

von

M. Nickel

G. Breitbach

J. Altes

K. H. Escherich

J. Wolters

Die Arbeit ist im Rahmen des Vertrages zwischen Bergbauforschung, GHT, HRB, KFA und Rheinische Braunkohlenwerke über die Entwicklung von Verfahren zur Umwandlung fester fossiler Rohstoffe mit Wärme aus Hochtemperaturreaktoren unter Förderung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie und das Land Nordrhein-Westfalen entstanden.

KURZFASSUNG

Reaktordruckbehälter aus Spannbeton sind innen mit einem Liner ausgekleidet, der die Gasdichtigkeit des Primärkreislaufs zu gewährleisten hat. Aufgrund seiner Herstellung und seiner Beanspruchung ist ein Versagen des Liners praktisch auszuschließen. Unterstellt man hypothetisch ein Leck im Liner, so ist es schwierig, den Leckort zu bestimmen, da der Liner eine großflächige Komponente ist.

Zur Dichtigkeitsüberwachung des Liners und als Dränagesysteme können direkt am Liner oder in Linernähe im Beton liegende Kanalrastersysteme angeordnet werden. Die Eignung solcher Kanäle für Leckdetektion, Leckortung und Dränage wurde experimentell untersucht. Als Versuchsmodell diente ein Liner/Beton-Segment von 2 m Höhe x 2,5 m Breite und 0,5 m Dicke mit zwei verschiedenen Kanalrastersystemen. Zur Simulation von Linerlecks wurde der Liner mehrfach durchbohrt.

Das Versuchsprogramm umfaßte:

- Bestimmung der Gaseinspeiseraten an verschiedenen Leckorten des Versuchsmodells,
- Leckdetektions- und Ortungsversuche und
- Bestimmung des Druckaufbaues im Beton und hinter dem Liner.

Die Messungen ergaben, daß Kanalsysteme zur Leckageüberwachung und zur kontrollierten Abführung des entweichenden Kühlgases am besten geeignet sind, wenn sie direkt am Liner angeordnet werden. Die Funktionsfähigkeit nimmt stark ab, je weiter die Kanäle vom Liner entfernt in den Beton hineinverlegt werden.

SUMMARY

The internal surfaces of prestressed concrete pressure vessels are fitted with a steel liner to preserve the gas tightness of the primary circuit. Because of the high quality manufacture and the loading conditions a liner failure can be practically excluded. However, if it is hypothetically assumed, that a leak develops during reactor operation, it may be difficult to determine the position of the leak, because the liner area is very large.

For tightness surveillance and for venting channel systems installed in close proximity to the liner are suitable. The suitability of such channels for leak detection, localisation and venting was investigated experimentally. A concrete wall (length 2,5 m, height 2,0 m, thickness 0,5 m) was constructed, covered on one side with a steel liner. Behind the liner two different channel systems have been installed. For the simulation of leaks holes were drilled into the liner.

The experimental program contained the following measurements:

- determination of gas flow rates into the different leaks,
- distribution of leakage gas over the array of channels,
- determination of pressures into the concrete and immediately behind the liner.

The experiments have shown, that channel arrays immediately adjacent to the liner are the most suitable systems for localisation and controlled exhaust of leakage gas. The suitability decreases, if the channels are set into the concrete somewhat distant from the liner.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. EINLEITUNG	1
2. ANFORDERUNGEN AN EIN ÜBERWACHUNGSSYSTEM	2
3. LECKORTUNGS- UND DRÄNAGESYSTEME	2
4. VERSUCHSPROGRAMM	4
5. VERSUCHSAUFBAU	5
5.1 Versuchsmodell	5
5.2 Leckagegaseinspeisung	10
5.3 Leckagegasnachweissystem	11
6. MESSPROGRAMM	14
6.1 Bestimmung der Gaseinspeiseraten in die im Liner befindlichen Leckbohrungen	14
6.2 Bestimmung der Leckgaseinströmraten in die Kanäle (Detektions- und Ortungsversuche)	14
6.3 Messung des Druckaufbaues zwischen Liner und Beton und im Beton infolge Gaseinspeisung und Wasserdampfbildung	14
6.4 Temperaturmessungen im Beton und am Liner	15
6.5 Messungen von Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung	15
7. VERSUCHSABLAUF	15
8. VERSUCHSERGEBNISSE	16
8.1 Versuche vor der Aufheizung des Liners (Linertemperatur ca. 20 °C)	16
8.2 Versuche bei einer Linertemperatur von 70 °C	20
8.3 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur und Messungen im kalten Zustand	23
8.4 Temperaturzyklieren des Modells (Linertemperatur: Raumtemperatur/70 °C)	25
8.5 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur und Messungen im kalten Zustand (nach dreimaligem Temperaturzyklieren (20/70 °C))	28
8.6 Aufheizen des Liners auf 120 °C	30
8.7 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur (ca. 20 °C) und Messungen im kalten Zustand	33
8.8 Temperaturzyklieren des Modells (20 °C/120 °C)	34
8.9 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur (ca. 20 °C) und Messungen im kalten Zustand	35

	<u>Seite</u>
8.10 Anpressen des Liners um ein ausgesuchtes Leck	36
8.11 Vergießen der direkt auf dem Liner befindlichen Kanäle	40
9. ZERSÄGEN DER MODELLWAND UND RISSUNTERSUCHUNGEN AN DEN TEILSTÜCKEN	43
10. ZUSAMMENFASSUNG	44
LITERATURANGABEN	46
VERZEICHNIS DER TABELLEN UND ABBILDUNGEN	47

1. EINLEITUNG

Die als Liner bezeichnete innere, stählerne Auskleidung des Spannbetonbehälters (SBB) eines Hochtemperaturreaktors hat die Gasdichtigkeit des Primärkreislaufs zu gewährleisten. Seine Dichtigkeit ist maßgebend für die Betriebstüchtigkeit des SBB. Der Liner ist wegen seiner Dicht- und Einschlußfunktion eine Spaltproduktbarriere /1,2/.

Bei der Auslegung des Liners sind alle Belastungen zu berücksichtigen, die während der Reaktorlebensdauer auftreten. Aufgrund des Formschlusses zwischen Betondruckkörper und Liner werden beim Vorspannen dem Liner Verformungen aufgeprägt. Durch Kriechen und Schwinden des Betons unter Vorspannung, bei Inbetriebnahme und im Betrieb erfährt der Liner ebenfalls zahlreiche Verformungszyklen. Weitere Belastungen entstehen z.B. aus dem Eigengewicht, den Schweißeigenspannungen, dem Temperatur- und Druckwechsel bei Abschaltungen /1,2/.

Die Auslegung des Liners auf Lebenszeitintegrität ist Stand der Technik, so daß ein Versagen hypothetisch ist. Trotzdem, insbesondere wegen der Nichtinspizierbarkeit dieser großflächigen Komponente, wurde vorgeschlagen, Systeme betonseitig am Liner zu installieren, die eine Lecklokalisierung ermöglichen und in Doppelfunktion gleichzeitig eine Drainage gewährleisten, um einen eventuellen Druckaufbau hinter dem Liner zu begrenzen. Gründe für die Diskussion solcher Systeme sind

- der große Aufwand, den eine Lecklokalisierung ohne ein solches System erfordern würde und
- die Drücke, die durch Verdampfen von Betonwasser oder durch ausströmendes Primärgas auftreten können.

In diesem Bericht sind die Ergebnisse über eine Versuchsserie dargestellt, die den Test eines Leckortungs- und Dränagesystems zum Ziel hatte.

2. ANFORDERUNGEN AN EIN ÜBERWACHUNGSSYSTEM

Es sind vor allem betriebliche Aspekte, die für eine Überwachung des Liners sprechen. Sollte, wie auch immer, ein Linerleck im Laufe der Reaktorlebensdauer entstehen und u.U. eine Reparatur erforderlich machen, so würde eine Überwachungseinrichtung, die gleichzeitig eine Leckortung ermöglicht, eine der Reparatur vorangehende Suche nach dem Ort der Schädigung erheblich erleichtern.

Ein solches System sollte die gesamte Linerfläche, die mit dem Primärgas in Berührung steht, erfassen, d.h. auch die Nebenkavertnen und die Durchführungen. Es muß die Früherkennung des Verlustes von Primärgas sowie eine ausreichend genaue Lokalisierung eines Lecks ermöglichen. Richtwert für die Lokalisierungsgenauigkeit ist etwa die Fläche von 1 m^2 . Dieser Wert wird hauptsächlich durch den großen Aufwand, der durch eine Reparatur gegeben ist, bestimmt /11/. Das System sollte kontinuierlich und unter Reaktorbedingungen betrieben werden können. Es sollte die Bestimmung der Leckrate innerhalb bestimmter Grenzwerte und damit eine Aussage über die Schadensgröße erlauben.

Eine weitere wesentliche Bedingung ist seine Funktionstüchtigkeit auf Lebenszeit. Aus diesem Grunde ist großer Wert auf Verwendung von sehr robusten Bauteilen zu legen.

3. LECKORTUNGS- UND DRÄNAGESYSTEME

Als aussichtsreichstes Überwachungssystem werden linernahe (Abb. 2) oder direkt auf dem Liner installierte Kanäle (Abb. 1, im Beton ausgesparte 'nackte' Kanäle oder auf den Liner geschweißte Hohlprofile, die über Öffnungen zum Beton hin durchlässig sind) angesehen, die, waagrecht und senkrecht angeordnet, den Liner rasterartig überdecken. Es wird nun erwartet, daß im Falle eines Linerlecks das austretende Helium hauptsächlich in lecknahe vertikale und horizontale Kanäle gelangt. Durch eine geeignete Detektionseinrichtung kann die Erhöhung des Heliumpegels in den einzelnen Kanälen festgestellt werden, wobei die koordinatenartige Anordnung eine je nach Belegungsdichte mehr oder weniger große Fläche als Leckort ausweist /4,7,11/.

Ein am Liner installiertes Kanalsystem ist nicht nur unter betrieblichen Gesichtspunkten als Leckdetektions- und Ortungssystem von Bedeutung. Technisch gesehen stellte es ein Dränagesystem dar, das einen Druckaufbau im Beton direkt hinter dem Liner begrenzt bzw. verhindert /5/. Ein solcher Druckaufbau kann nach einem hypothetischen Linerschaden durch ausströmendes Helium oder nach einem hypothetischen Isolierungsschaden bei einer Überhitzung des linernahen Betons durch Verdampfen des im Beton gebundenen Wassers verursacht werden.

Im folgenden wird über eine Experimentserie berichtet, in der die Eignung von Kanalsystemen zur Leckdetektion, Leckortung und Dränage getestet wird /6,10/. Als Versuchsmodell dient ein Betonsegment mit einem durch Bolzen und aufgeschweißte Kühlrohre im Beton verankerten Liner.

In das Versuchsmodell wurden zwei Kanalrastersysteme eingebaut. Der Liner wurde zur Simulation von Lecks an verschiedenen Stellen angebohrt. Die beiden aus einer Reihe von Vorschlägen ausgewählten Kanalrastersysteme waren

- ein direkt am Liner befindliches Kanalsystem /4,7/,
- ein etwas vom Liner entfernt angeordnetes Kanalsystem /4/.

Für das am Liner befindliche System werden die auf dem Liner aufgeschweißten Kühlrohre zur Bildung horizontaler Leckagegaspfade ausgenutzt. Dabei werden die Kühlrohre durch geeignete Profilgebung derart geändert, daß der ohnehin nach der Kühlrohr-aufschweißung zwischen Liner und Kühlrohr befindliche Spalt erweitert wird und somit als Kanal für Leckagegas genutzt werden kann. Für die Liner der größeren Kavernen sind zusätzlich linernah (kühlrohrtangierend) vertikale Kanäle vorgesehen, die in Abständen eingebracht zusammen mit den Pfaden unter den Kühlrohren ein orthogonales Raster bilden (s. Abb. 1) /3,7/.

Das im Abstand vom Liner im Beton angeordnete System besteht aus nackten horizontalen und vertikalen Kanälen, die den Betonkörper durchdringen (Abb. 2).

4. VERSUCHSPROGRAMM

Die Versuche stellen einen ersten Schritt zum Funktionsnachweis solcher Kanalsysteme dar (s. auch /9,10/). In dem Modell wurden reaktorspezifische Anordnungen, Zustände und Materialien, die Einfluß auf die Funktionsfähigkeit der Systeme nehmen, nachgebildet; jedoch wurde auf das Vorspannen des Betonkörpers und auf das großflächige Anpressen des Liners durch den Reaktorinnendruck verzichtet, um den Versuchsaufwand in dem geplanten Rahmen zu halten.

Das Fehlen des Anpreßdrucks machte es erforderlich, den Leckagegaseinspeisedruck am angebohrten Liner auf wenige Bar (gemessen wurde bis max. 3 bar) zu begrenzen, um ein Abheben des Liners vom Beton zu verhindern. Um jedoch den Einfluß des Anpreßdruckes zu erfassen, wurden auch Messungen unter örtlichem Anpressen des Liners um eine ausgewählte Leckagegasbohrung durchgeführt, so daß höhere Einspeisedrücke möglich waren.

Zur Erfassung der temperaturbedingten Einflüsse auf die Funktionsfähigkeit der beiden Kanalsysteme war der Liner mit Heizmaten beheizbar. Die für den Versuchsbetrieb gewählten Temperaturstufen von 70 °C und 120 °C entsprechen den mittleren und maximalen Linertemperaturen im Normalbetrieb eines HTR (kaltgehender Liner) /1,2/. Die Funktionsfähigkeit der Kanalsysteme hinsichtlich Leckortung hängt zum größten Teil vom Zustand des Liner-Betonverbundes ab. Es wird erwartet, daß durch Thermospannungen der Liner-Betonverbund des Versuchsmodells gestört wird und es unter Umständen auch zu Rissen im Beton kommen wird. Aus diesem Grunde wurde im Versuchsprogramm die Temperaturzyklisierung vorgesehen (Reaktorab- und Anfahrvorgänge). Zur Untersuchung der Beeinflussung des hinteren Systems durch das am Liner befindliche System wurden zum Schluß die direkt am Liner befindlichen horizontalen und vertikalen Kanäle mit Mörtel verpreßt.

Die Untersuchungen zur Leckdetektion und Dränage wurden bei folgenden Zuständen des Liner-Beton-Segments durchgeführt:

- Liner kalt (Raumtemperatur)
- Liner ca. 70 °C
- Temperaturzyklisieren, dreimaliges Aufheizen und Abkühlen des Liners (70 °C/Raumtemperatur)

- Liner ca. 70 °C nach Zyklisierung
- Liner kalt (Raumtemperatur) nach Zyklisierung
- Liner 120 °C
- Temperaturzyklisieren, dreimaliges Aufheizen und Abkühlen des Liners (120 °C/Raumtemperatur)
- Liner 120 °C nach Zyklisieren
- Liner kalt (Raumtemperatur) nach Zyklisierung
- Liner kalt, örtliches Anpressen des Liners
- Liner kalt, die Kanäle des direkt auf dem Liner befindlichen Systems wurden mit Vergußmörtel verpreßt.

5. VERSUCHSAUFBAU

Die Versuchseinrichtung, wie sie auch in Abb. 3 dargestellt ist, besteht aus drei Teilen:

- Versuchsmodell (Liner-Beton-Ausschnitt)
 - Leckagegaseinspeisung
 - Leckagegasabsauganlage mit Heliumdetektionsapparatur.
- Sie wird im folgenden detailliert beschrieben.

5.1 Versuchsmodell

Der Aufbau des Versuchsmodells und seine Hauptabmessungen sind aus der Abb. 4 zu entnehmen. Die wesentlichsten Maße sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Der Beton ist von einer nach hinten offenen kastenförmigen Bleckkonstruktion aus Baustahl (Abb. 4, 7 und 8) umgeben. Die Vorderseite ist mit einer Wandstärke von 8 mm als Liner ausgebildet. In Abständen von 100 mm sind horizontal angeordnete Vierkantrohre mit den Abmessungen von 25 mm x 25 mm x 2 mm betonseitig aufgeschweißt. Zur Verankerung des Liners im Beton sind in einem Raster von 300 mm Kopfdübelbolzen mit einer Länge von 300 mm und einem Durchmesser von 18 mm angebracht. In den betonbegrenzenden Seitenblechen und im Decken- und Bodenblech des Stahlkastens sind Führungshülsen eingeschweißt, in die vor dem Betonverguß Stangen zur Herstellung der nackten Betonkanäle eingeschoben werden konnten. Nach dem Vergießen der Konstruktion wurden diese häufig gedreht und nach entsprechender Aushärtung des Betons gezogen, so daß Röhren im Beton zurückblieben.

- Installierte Kanalraster -

In das Versuchsmodell wurden zwei unabhängige Kanalraster eingebaut (Abb. 4 und 7). Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die Abmessungen und Lagen des vorderen und hinteren Kanalrasters. Vertikale, die Vierkantrohre tangierende Betonkanäle bilden zusammen mit den angebohrten Vierkantrohren das direkt am Liner angeordnete Detektions- und Ortungssystem.

Die auf dem Liner aufgeschweißten Vierkantrohre, die beim Reaktorliner als Kühlrohre dienen, können hier direkt als horizontale Detektionskanäle verwendet werden, da eine Kühlung des Linerausschnitts nicht vorgesehen ist. Die Vierkantrohre sind durch 4 mm \varnothing Bohrungen zum Beton hin offen, so daß das Leckagegas an der Grenzschicht Liner-Beton in die Rohre einströmen kann. Lage und Anzahl der Bohrungen sind aus Abb. 5 zu entnehmen. Die sechs vertikalen Kanäle, die die Vierkantrohre tangieren, sind nackte Betonkanäle mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Teilung von 300 mm (Abb. 7).

Die etwas zurückliegenden Kanalreihen bilden ein zweites liner-nah im Beton liegendes System, bestehend aus nackten Betonkanälen von

- vier horizontalen 100 mm vom Liner entfernten Kanälen mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Teilung von 500 mm und
- fünf vertikalen 280 mm vom Liner entfernten Kanälen mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Teilung von ebenfalls 500 mm.

- Beton -

Vor dem Betonieren des Modells wurden die Gaseintrittsbohrungen der am Liner angebrachten Vierkantrohre mit einem Spachtel mit Beton verschmiert, so daß beim Verguß keine Zementschlämpe in das Innere der Rohre eindringen konnte. Die Stahlstangen zur Erstellung der nackten Betonkanäle wurden eingeschoben, die Thermoelemente und die Druckmeßkapillarrohre wurden positioniert und gehalten. In die Druckmeßkapillarrohre wurden Stäbe eingebracht, die nach dem Verguß gezogen wurden, so daß auch hier ein Zusetzen durch Zementschlämpe verhindert wurde. Im Abstand von rd. 50 mm von der Linerwand entfernt wurde ein Bewehrungsgeflecht positio-

niert, dessen Maschenweite ca. 190 mm, bei einem Durchmesser der Geflechtstangen von 12 mm, beträgt. Detaillierte Angaben betreffs Anordnung und Maße der schlaffen Bewehrung sind aus Abb. 9 ersichtlich.

Der Beton selbst wurde aus Qualitätsgründen vor Ort hergestellt und in die in ihrem offenen Teil holzverschälte Konstruktion gegossen. An der Holzschalung wurden zwei Außenrüttler angebracht. Außerdem wurde mit Innenrüttlern verdichtet. Der Betoniervorgang war nach etwa 3 h abgeschlossen. Die Stahlstäbe, die zur Ausbildung der Kanalaraster eingebracht worden waren, wurden während des Betonaushärtens häufig gedreht und etwa 7 h nach Beendigung des Vergusses gezogen, wobei die gewünschten nackten Betonkanäle entstanden.

Die Daten des verwendeten Betons sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Es handelt sich um einen hochfesten Beton, wie er für Reaktorspannbetonbehälter geeignet ist und beim THTR-Behälter verwendet wurde. Die Aushärte- bzw. Trocknungszeit des Betons betrug 2 Monate. Erst danach begannen die Versuche. Der erste Test nach der Aushärtung des Betons betraf den Zustand des Stahl-/Betonzusammenwirkens im Bereich des Liners. Durch leichtes Klopfen mit einem Hammer konnte bereits jetzt an der unbenutzten Wand, durch dumpfen und hellen Klang erkennbar, festgestellt werden, daß der Liner in weiten Bereichen nicht satt an den Beton anlag. Ein spaltfreies Haften war bei einem unter obengenannten Fertigungsverfahren hergestellten Bauteil wie dem Versuchsmodell, nicht zu erreichen. Die Bestätigung des Verlustes der Haftung erbrachten die im Kapitel 'Versuchsergebnisse' beschriebenen Meßergebnisse.

- Linerlecks -

Zur Simulation von Lecks wurden - vor dem Betonieren - 4 mm Löcher in den Liner gebohrt. Insgesamt wurden 30 Bohrungen in einem Raster von 300 mm Abstand eingebracht, so daß eine Vielzahl von 'Linerlecks' in verschiedenen Bereichen des Modells zum Testen der Detektions- und Ortungssysteme vorhanden war (Abb. 5, 11 und 12).

In die mit Gewinde versehenen Bohrungen wurden nach dem Betonieren Röhrrchen mit den Abmessungen von 6 x 1 mm eingeschraubt, auf die je ein Kleinflansch aufgeschweißt worden war. Im Versuchsbetrieb werden ein bzw. mehrere Lecks an eine Heliumdruckleitung angeflanscht, während die anderen Lecks verschlossen werden (Abb. 3, Pos. 11).

- Druckmeßstellen im Beton -

Die dünnen, in Abb. 7 im oberen Bereich des Modells zu erkennen- den vertikalen Röhrrchen sind für Druckmessungen in den Betonpo- ren vorgesehen. Sie sind um das Leck Nr. 16 im mittleren Liner- bereich gruppiert. Die Röhrrchen ragen in vertikaler Richtung ca. 850 mm in den Beton und weisen einen Außendurchmesser von 4 mm bei einer Wandstärke von 1 mm auf. Zur Verringerung des Druck- raumvolumens wurden Stahldrähte von 1 mm \varnothing in die Röhrrchen ein- geschoben. Die sich bei den Versuchen einstellenden Drücke wur- den über an die Röhrrchen angeflanschte Manometer gemessen. Die Staffelungstiefe der Druckmeßrohre, ihre Lage zur schlaffen Be- wehrung, zum Kanalraster und zu den Linerbolzen ist aus den Ab- bildungen 7 und 10 ersichtlich.

- Temperaturmeßstellen im Beton und am Liner -

Im Versuchsprogramm ist vorgesehen, Liner und Beton aufzuhei- zen, um die Eignung der Detektions- und Ortungssysteme auch bei thermischer Belastung und Zyklierung zu überprüfen, da zu er- warten ist, daß durch diese Belastung die Haftung zwischen Be- ton und Liner wahrscheinlich in größerem Maße gestört wird. An zwei Stellen des Versuchsmodells wurden im rechten und lin- ken Wandteil in gleicher Höhe, jedoch im Abstand zum Liner ge- staffelt, je eine Reihe Ni-CrNi-Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 1 mm eingebaut. Die Anordnung und die Lage der Temperaturmeßstellen sind den Abbildungen 9 und 10 zu entneh- men. Um die Position der im Beton befindlichen Temperaturmeß- stellen auch während des Betonierens zu garantieren (geringe Stabilität der 1 mm Thermoelemente), wurden vorher kleine Be- tonbalken von 60 x 40 mm gegossen, in denen die Thermoelemente eingebettet sind. Diese Betonbalken wurden vor dem Betonieren

an zwei Linerkopfdübelbolzen befestigt. Zusätzlich wurden am Ende dieser beiden Bolzen und am Liner selbst Temperaturmeßfühler installiert. Zu diesem Zweck wurden Nuten in den Liner und in die Bolzenenden eingesägt und die Thermoelemente eingelegt und verstemmt.

- Heizung und Isolierung des Liners -

Die nach dem Versuchsprogramm erforderlichen Temperaturen von bis zu 120 °C wurden durch eine Belegung des Liners mit einer dreiteiligen Heizmatte, in der durch entsprechende Aussparungen die Leckagegaseinspeisestellen freigehalten waren, erreicht (Abb. 11 und 12). Die Heizmatten waren ausgelegt für eine maximale spezifische Heizleistung von 1,5 kW/m² Heizfläche und wurden über einem Steuerschrank (Temperaturfühler und -regler) betrieben. Um eine gleichmäßige und möglichst verlustarme Heizung des Liners zu erreichen, wurden die Heizmatten über ein aus Flachstahl bestehendes Gitter an den Liner angepreßt und auf alle Stahlaußenwände des Modells eine 80 mm dicke Wärmeisolierung aus Al-kaschierter Steinwolle aufgebracht (Abb. 13). Die zur Temperaturregelung erforderlichen Temperaturfühler wurden mit demselben Flachstahlgitter angedrückt, so daß ein guter Kontakt erreicht wurde.

Die Temperaturänderungen des Liners bei Aufheiz- und Abkühlungsvorgängen wurden entsprechend den Bedingungen des HHT-Projektes stets kleiner als 5 °C/h gehalten.

- Anpreßvorrichtung -

Für die Versuche mit örtlich angedrücktem Liner wurde eine Vorrichtung verwendet, die im wesentlichen aus zwei stehenden Stützträgern, vier Trägerverbundstangen, einem Druckstempel und einer Druckplatte von 300 mm Ø bestand. Mit dieser Vorrichtung war es möglich, den Liner zwingenartig an den Beton anzupressen (Abb. 28).

Als Stützträger wurden durch Bleche verstärkte Doppel-T-Träger (IPB 260) verwendet, von denen einer vor dem Modell (linerseitig) und einer hinter dem Modell (betonseitig) in ihrer Höhe das Modell überragend aufgerichtet waren. Durch vier Stahlstangen

von 36 mm \emptyset (zwei unter dem Modell und zwei über dem Modell) wurden die beiden Träger miteinander verbunden. Ein Hydraulikdruckstempel, eingebracht zwischen Modell und linerseitigem Stützträger, gestattet so, den Liner örtlich um ein ausgesuchtes Leck anzupressen. Das Anpressen des Liners an den Beton erfolgte über eine Druckplatte aus Aluminium, um selbst bei kleineren Linerunebenheiten durch Deformation der Platte eine möglichst ganzflächige Druckübertragung zu erreichen.

5.2 Leckagegaseinspeisung

Das Einspeisesystem besteht aus der Helium-Druckgasflasche, der Flaschenarmatur, einem kleinen Druckbehälter (3 l Inhalt), Schwebekörper-Durchflußmessern, Druckmeßmanometern, den entsprechenden Rohrleitungen und Absperrarmaturen. Einzelheiten sind der Abb. 3 zu entnehmen.

Die Einspeisung des Heliums in die als Leck dienenden Bohrungen im Liner erfolgte über eine dünne Rohrleitung, die in ihrer Flexibilität und Länge geeignet war, jede Leckagegasbohrung zu erreichen. Die Einspeisedrücke lagen in Bereichen von bis zu 3 bar bei den Versuchen ohne Anpressen des Liners und wurden beim Lineranpressen bis auf 20 bar gesteigert. Die Durchflußmesser (Pos. 7-10) deckten einen Bereich von 0,1 l/h bis 5000 l/h Helium ab (jeweils bezogen auf den Einspeisedruck). Zusätzlich wurde für Drücke oberhalb 10 bar ein Ganzmetall-Schwebekörper-Durchflußmesser mit einem Bereich von ca. 5 Nm³/h Helium bei 2 bar bis hin zu 500 Nm³/h Helium bei 20 bar eingesetzt.

Der 3 Liter-Druckbehälter (Pos. 3) hat eine doppelte Funktion. Wenn bei der Einspeisung Heliumströme auftreten, die im Meßbereich der Durchflußmesser liegen, dient er als Beruhigungsbehälter für das aus der Flasche strömende, druckreduzierte Heliumgas. Sind die in den Beton eindringenden Gasmengen so klein, daß die Durchflußmesser nicht mehr ansprechen, so wird der Druckbehälter von der Flasche abgekoppelt. Das in den Beton eindringende Helium wird dann über den Druckabfall des Behälters bestimmt, wobei man allerdings berücksichtigen muß, daß der Druckabfall im Behälter auch geringfügig durch Leckagen im Einspeisesystem beeinflußt werden kann.

5.3 Leckagegasnachweissystem

- Absauganlage -

Die aus dem Modell durch entsprechende Endstücke beidseitig aus dem Beton herausgeführten Kanäle sind über Ventile absperrbar (Abb. 3 - Pos. 13). Ein Ende jeden Kanals ist an die Absauganlage angeschlossen. Diese besteht im wesentlichen aus dem Hauptsammler, dem Lokalisierungssammler, Durchflußmessern, Druckmeßmanometern, Saugpumpen und den entsprechenden Rohrleitungen und Absperrarmaturen.

Der Haupt- (Pos. 16) und der Lokalisierungssammler (Pos. 17) sind zwei parallel zueinander angeordnete Behälter, die durch Leitungen miteinander verbunden sind. Die Anzahl der Verbindungsleitungen ist gleich der Anzahl der Leckagegaskanäle im Modell. In diese Verbindungsleitungen münden - je Leitung eine - über 3-Wege-Hähne (Pos. 14) alle von den Leckagegaskanälen kommenden Leitungen, so daß je nach Hahnstellung die Möglichkeit besteht, den Leckagegasstrom eines jeden Kanals separat auf den Lokalisierungssammler zu führen, wobei die restlichen Kanäle auf dem Hauptsammler geschaltet bleiben.

Nach dem Hauptsammler splittet sich das System in zwei Stränge auf, die im folgenden als Hauptstrang und Lokalisierungsstrang bezeichnet werden. In beiden Strängen befinden sich je ein Druckmeßmanometer (Bereich von - 1 bar bis 0,6 bar; Pos. 22) ein Schwebekörper-Durchflußmesser (Bereich von 240 l/h - 2400 l/h Luft; Pos. 23) und eine Absaugpumpe (Saugvermögen 0,85 m³/h; Pos. 24). Durch entsprechende Stellungen der Absperrarmaturen können nun die Gesamtheit der Leckagegaskanäle, jeder einzelne Kanal oder auch Gruppen von Kanälen über den Haupt- bzw. den Lokalisierungssammler abgesaugt werden. Durch diese Anordnung und mit einem über eine Stichleitung aus dem Lokalisierungsstrang abgezweigten Teilgasstrom, der einem Heliumdetektor zugeführt wird, ist es möglich, die integrale Heliumrate bzw. die eines jeden Kanals zu erfassen.

Abhängig von der Heliumgasmenge, die in den Kanälen anfällt, kommen zwei Meßmethoden zur Anwendung. Sind die Gasraten von der Leckstelle zu den einzelnen Kanälen relativ groß (Bereich Nl/h),

wird das Trägergasverfahren angewendet. Dabei werden die an den Kanalenden befindlichen Ventile geöffnet, so daß Umgebungsluft mit angesaugt wird und der Luftstrom das eindringende Helium kontinuierlich mit sich fortführt. Die Luftströme eines jeden einzelnen Kanals werden auf ihren Heliumgehalt untersucht. Fallen sehr kleine Heliummengen an (Mengen, bei denen die Durchflußmesser des Einspeisesystems nicht mehr ansprechen), werden die Kanalabsperrröhre (Pos. 13) während der Einspeisung in ein ausgesuchtes Leck geschlossen (bis zu 20 h). Die in das Leck eindringende Heliummenge wird über den Druckabfall des 3-Liter-Behälters (Pos. 3, im Einspeisesystem) bestimmt. Während der Absperung (bis zu 20 h) sammelt sich in den Kanälen Helium, dessen Konzentration über eine Schnüffelleitung (Pos. 28a) und eine Saugpumpe (Pos. 26), die Bestandteil der Heliumdetektionseinheit ist, Kanal für Kanal bestimmt. bei dieser Methode wird die Absauganlage nicht betrieben.

- Heliumdetektor -

Als Helium-Nachweisgerät wird ein in Serie gebauter Helium-Massenspektrometer-Leckdetektor (Leybold-Heraeus, 'Ultratest F') - im folgenden Heliumdetektor genannt - verwendet (Abb. 14). Das Gerät ist für universelle Lecksuchaufgaben geeignet und besteht im wesentlichen aus folgenden größeren Komponenten: einem auf Helium festeingestellten Massenspektrometer, Vakuum-Pumpstand, Tiefkühlfalle, Bedien- und Anzeigenelektronik und einer Schnüffelleitung mit nachgeschalteter Membranpumpe (Leybold-Heraeus 'Quick-Test').

Abweichend von der Standard-Ausführung des Heliumdetektors wurde zur Erfassung großer Heliummengen eine Meßbereichserweiterung durch Einbau eines geänderten Vorverstärkers vorgenommen. Dadurch konnten problemlos auch Mengen von bis zu 100 % Helium quantitativ erfaßt werden. Eine prinzipielle Übersicht über den Heliumdetektor gibt Abb. 14. Der Anschluß des Detektors an das System erfolgte, je nach in die Modellwand eingespeister Heliummenge, in zweifacher Weise. Bei niedrigen Einspeiseraten wurde die Schnüffelspitze des Heliumschnüfflers ('Quick-Test'), die über eine 5 m lange Kapillarleitung (Abb. 3, Pos. 28a und 28b) mit der Membranpumpe (Pos. 26) verbunden ist, direkt an die

Leckortungskanäle der Modellwand angeschlossen. Bei größeren Heliummengen wird die Schnüffelspitze in ein Abzweigstück (Pos. 25) der Absauganlage eingesetzt und so ein Teilstrom des Helium-Luft-Gemisches aus dem Lokalisierungssammler der Absauganlage abgezogen und dem Heliumdetektor zugeführt.

- Eichung des Heliumdetektors -

Entsprechend seinem hauptsächlichen Verwendungszweck als Leckdetektor ist die Anzeige des Gerätes so gestaltet, daß direkt Leckagegasströme abgelesen werden können. Bei Verwendung des Gerätes als Heliumkonzentrationsmeßgerät muß die Anzeigenskala auf die Heliumpartialdrücke des von der Membranpumpe (Quick-Test Pos. 26) angesaugten Helium-Luft-Gemisches abgestimmt werden.

Zur Eichung des Gerätes wurde das Leckagegaseinspeisesystem nicht an die Modellwand, sondern direkt an den Hauptsammler der Absauganlage (Pos. 16) angeschlossen, so daß verschiedene, genau definierte Heliummengen dem Luftstrom der Absauganlage beige-mischt werden konnten. Über die Durchflußmesser des Einspeise- und des Absaugsystems wurde der jeweilige Helium- und Luftanteil ermittelt und über die Anzeige des Heliumdetektors eine Eichkurve erstellt, die den Auswertungen der Versuche zur Bestimmung der Leckagegaseinströmraten in die Kanäle (Ka. 2.2.2) zugrunde liegt.

Die Eichung des Heliumdetektors wurde im Laufe der Versuchszeit zur Kontrolle mehrmals wiederholt.

6. MESSPROGRAMM

6.1 Bestimmung der Gaseinspeiseraten in die im Liner befindlichen Leckbohrungen

Die Messungen der Einspeiseraten über die simulierten Linerlecks in die Wand sollen eine Abschätzung über den Bereich von Primär-gasverlusten ermöglichen, die nach Linerlecks bei modellanalogen Werken zu erwarten sind (s. auch /8/). Aus den Änderungen der Raten beim Übergang von einem auf den anderen Versuchsmodellzustand lassen sich Aussagen über den Kontaktzustand Liner/Beton und des Zustandes des linernahen Betons machen.

6.2 Bestimmung der Leckgaseinströmraten in die Kanäle (Detektions- und Ortungsversuche)

Das in die Leckbohrungen eingespeiste Gas verteilt sich entlang der Liner-Beton-Grenzfläche, dringt in den Beton ein und gelangt in die Kanäle. Es wird erwartet, daß die lecknächsten Kanäle die höchste Gaseinströmrates aufweisen. Die Raten für jeden Kanal werden gemessen, um die Eignung der Kanäle für Leckortung nachzuweisen. Integralmessungen der Raten über alle Kanäle werden durchgeführt, um das Verhältnis eingepeistes Gas/über die Kanäle abgeführtes Gas zu ermitteln.

6.3 Messung des Druckaufbaues zwischen Liner und Beton und im Beton infolge Gaseinspeisung und Wasserdampfbildung

Im Beton sind über einbetonierte Kapillarröhrchen Druckmessungen vorgesehen. Zusätzlich stehen die Leckbohrungen am Liner für Druckmessungen an der Grenzfläche Beton/Liner zur Verfügung, so daß eine Erfassung des Druckaufbaues durch Leckagegas und Wasserdampfbildung gewährleistet ist. Über derartige Messungen soll die Wirksamkeit der Kanäle als Dränagesystem nachgewiesen werden. Druckmessungen werden sowohl bei geschlossenen (Simulation eines nicht funktionierenden Dränagesystems) als auch bei geöffneten Kanälen durchgeführt, so daß aus dem Vergleich auf die Effektivität der Dränagekanäle geschlossen werden kann.

6.4 Temperaturmessungen im Beton und am Liner

Die Temperaturmessungen dienen der Kontrolle der Temperaturzustände des Versuchsmodells. Mit vorhandenen Rechenprogrammen können Nachrechnungen der Temperaturprofile in der Betonwand vorgenommen und mit den gemessenen Werten verglichen werden.

6.5 Messungen von Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung

Das bei den einzelnen Temperaturstufen aus dem Beton freigesetzte Wasser wird durch Kondensation quantitativ bestimmt.

7. VERSUCHSABLAUF

Die Messungen, wie sie im Kapitel 6 beschrieben sind, wurden bei den im folgenden aufgelisteten Versuchsbedingungen durchgeführt. Die Reihenfolge der Beschreibung entspricht dem zeitlichen Ablauf der Versuche.

Die Daten der Temperaturmessungen wurden bei den Aufheiz- und Abkühlvorgängen bis zum Erreichen stationärer Temperaturzustände erfaßt. Messungen zur Leckortung, zur Durchlässigkeit der Leckorte und die Druckmessungen wurden nach Erreichen stationärer Temperaturen durchgeführt.

- Messungen vor der Aufheizung des Liners

- a) Eichmessungen Heliumdetektor (s. Kap. 5.3)
- b) Bestimmung der Gaseinströmraten in die im Liner befindlichen Leckbohrungen
- c) Bestimmung der Leckagegaseinströmraten in die Kanäle (Leckdetektion und -ortung)
- d) Messungen zum Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton infolge Gaseinspeisung

- Aufheizen des Liners auf 70 °C

Messungen 'a-d'

- e) Temperaturmessungen im Beton und am Liner
- f) Messungen von Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung

- Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur

Messungen 'a-e'

- Dreimaliges Temperaturzyklieren von Raumtemperatur auf 70 °C
Messungen 'a-f' bei 70 °C Linertemperatur
- Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur
Messungen 'a-e'
- Aufheizen des Liners auf 120 °C
Messungen 'a-f'
- Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur
Messungen 'a-e'
- Dreimaliges Temperaturzyklieren von Raumtemperatur auf 120 °C
Messungen 'a-f' bei 120 °C Linertemperatur
- Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur
Messungen 'a-e'
- Anpressen des Liners um ein Leck
Messungen 'c', 'b' und 'd' bei Raumtemperaturen
- Vergießen der direkt auf dem Liner befindlichen Kanäle
Messungen 'c', 'b' und 'd'.

8. VERSUCHSERGEBNISSE

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt in chronologischer Reihenfolge. Bei geänderten Versuchsbedingungen werden im wesentlichen nur die Messungen eingehender diskutiert, bei denen sich nennenswerte Änderungen zu den vorangegangenen Messungen ergeben haben.

8.1 Versuche bei Raumtemperatur (vor der Aufheizung des Liners)

Zwei Monate nach dem Betonverguß wurde mit den Versuchen begonnen. In der ersten Versuchsphase wirkte als zusätzliche Belastung nur der bei den Messungen eingestellte Leckagegaseinspeisedruck. Die Versuche fanden bei Temperaturen zwischen 18 °C und 24 °C statt.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Die in das Liner/Beton-Segment einströmenden Heliummengen schwankten stark von Leck zu Leck. Bei Lecks, in deren Umgebung der Liner-Beton-Verbund gestört war (s. auch Kap. 5.1), strömte viel Helium ein (bis zu 16,41 Pa m³/s bei 2 bar Einspeisedruck). Lag

der Beton im Bereich eines Lecks gut an, so wurden die Einspeiseraten um Zehnerpotenzen kleiner. Die kleinste Rate lag etwa bei 10^{-4} Pa m³/s. Eine Vergrößerung der Einspeisedrücke führte zu Einspeiseraten m , die etwas stärker als $m = A (P_{\text{ein}}^2 - P_{\text{atm}}^2)$ anstiegen.

Die Einspeiseraten stellten sich augenblicklich ein und blieben im wesentlichen konstant. Selbst das Öffnen oder Schließen der Detektions- bzw. Drainagekanäle änderte die Raten, wenn überhaupt, nur im Prozentbereich. Merkbliche Heliummengen traten an den Rändern des Versuchsmodells zwischen Beton und Seitenblech in die Atmosphäre aus. Bezüglich der Reproduzierbarkeit der Einspeiseraten ist zu bemerken, daß sich im Laufe der Versuche bei vorgegebenem Druck die Einspeiseraten bei dem größten Teil der Lecks nur wenig vergrößerten ('Reproduzierbarkeit in der Größenordnung'). Bei einigen Lecks wurde allerdings beobachtet, daß die Rate nach Anlegen eines höheren Drucks (bis 5 bar) schlagartig um Zehnerpotenzen anstieg. Wahrscheinlich ist hier die zu Beginn der Versuche in großen Bereichen vorhandene Haftung zwischen Liner und Beton gestört worden.

Eine Heliumeinspeisung in die einzelnen Lecks mit 2 bar_{abs} Einspeisedruck brachte das in Abb. 15 dargestellte Ergebnis. Dabei wurden die Gasdurchsätze der durchgängigen Lecks über die Durchflußmesser (Abb. 3, Pos. 7-10) gemessen, während der Durchsatz für die weniger durchlässigen Lecks über eine zweistündige Druckstandsprobe des Druckbehälters (Abb. 3, Pos. 3) ermittelt wurden. Die in das Modell bei unbeheiztem Liner eingesetzten Heliummengen sind in der Abb. 15 durch schwarze Kreise oder durchgehende schwarze Linien dargestellt. Die schwarzen Kreise kennzeichnen die Lecks, die als 'fast dicht' bezeichnet werden können (Durchsatz kleiner 10^{-2} Pa m³/sec). Die Höhe der durchgezogenen Linien zeigt die Einspeiseraten der durchgängigeren Leckorte. Zusätzlich sind in Tabelle 3 (Spalte 1) die Meßwerte aufgelistet.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Die Messungen zur Leckdetektion und -ortung wurden für zehn 'Linerleckbohrungen (Nr. 8, 10, 13, 15, 16, 17, 20, 22, 23 und 25) bei verschiedenen Einspeisedrücken (überwiegend jedoch bei 2,0 bar) durchgeführt. Zur Simulation von z.B. längeren Linerrissen wurden auch mehrere, nebeneinanderliegende Lecks simultan bespeist (Nr. 10, 16 und 22). Beton besitzt für Helium ein großes Speichervermögen. Daher wurden die Kanäle vor jeder neuen Messung abgesaugt und so verhindert, daß die vorherige Einspeisung die Folgemessungen beeinflusste. Während des Absaugens wurden die Kanäle tränergaseintrittsseitig (s. Kap. 5.3) geschlossen, damit im Beton möglichst ein Druckgefälle zu den Kanälen hin erzeugt wurde, um so ein schnelleres Entfernen des in den Betonporen gespeicherten Heliums zu erreichen.

Bei allen getesteten Lecks oder Leckpaarungen - ob große oder kleine Einspeiserate - wurde in den lecknächsten Kanälen das meiste Helium gefunden, so daß eine Leckortung im Bereich der jeweiligen Rastergröße für beide Kanalsysteme möglich war (s. Abb. 18-20).

Für das System auf dem Liner ist zu unterscheiden zwischen Lecks mit hohen Einspeiseraten ('Durchgangslecks' gestörter Beton-Liner-Verbund) und Lecks mit kleinen Einspeiseraten. Die Helium-einströmraten in die Kanäle hängen hier sehr stark von der Leck-einspeiserate ab (s. Abb. 18 und 19). Das in Abb. 19 dargestellte Ergebnis wurde bei kleiner Einspeiserate gewonnen. Bemerkt sei hier zu der Abb. 19, daß der Leckort 20 eines der Lecks war, dessen Einspeiserate im Laufe der Versuche schlagartig um Größenordnungen zunahm. Abb. 18 zeigt eine charakteristische Verteilung der Heliumeinströmraten für ein Leck mit hoher Einspeiserate. Die Einströmmaxima (Kanal H6, V3) sind hier ausgeprägter.

Für das linerentfernt im Beton liegende Kanalsystem hatte die Leckeinspeiserate kaum Auswirkungen auf die Heliumeinströmraten in die Kanäle. Abb. 20 zeigt eine Verteilung der Raten, die sowohl für Lecks mit großer als auch mit kleiner Einspeiserate typisch sind.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Die Messungen zum Druckaufbau wurden im Spalt Liner/Betonkörper und im angrenzenden Beton durchgeführt. Dabei wurden Versuche sowohl bei geöffneten als auch bei abgesperrten Detektions- bzw. Dränagekanälen gemacht (s. Kap. 6.3). Die Druckmessungen zwischen Liner und Beton wurden durchgeführt, indem an die Lecks, die dem Einspeiseleck benachbart waren, Manometer angebracht wurden. Die Messungen erfolgten bei einem Einspeisedruck von 2 bar_{abs}. Bei den Messungen zum Druckaufbau im Beton wurden in den einbetonierten Röhrchen (s. Kap. 5.1) selbst nach langen Einspeisezeiten (Bereich mehrere Stunden) keine meßbaren Drücke registriert. Bei der Einspeisung in eine Leckbohrung zeigte sich, daß der Druck direkt hinter dem Liner mit zunehmender Entfernung von der Einspeisestelle sehr schnell abfiel. Das traf sowohl bei geöffneten als auch bei abgesperrten Kanälen zu.

In einer weiteren Meßreihe wurde jeweils einer der direkt auf dem Liner befindlichen Kanäle druckbeaufschlagt (2 bar_{abs}) und der sich in den restlichen Kanälen einstellende Druck gemessen. Auch hier nahm mit zunehmenden Abständen der Kanäle vom bespeisten Kanal der Druck sehr stark ab. In den etwas vom Liner entfernt im Beton angeordneten Kanälen konnten keine meßbaren Drücke festgestellt werden. Der Druckabbau erfolgte offensichtlich entlang der Liner/Beton-Grenzfläche, an deren Rändern auch merkliche Heliummengen in die Atmosphäre austraten.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Die Einspeiseraten zeigen von Leck zu Leck aufgrund geänderter Kontaktzustände zwischen Beton und Liner Schwankungen über mehrere Größenordnungen.
- Detektion und Ortung der Lecks ist unabhängig von der Einspeiserate in beiden Systemen immer möglich.
- Ein Druckaufbau hinter dem Liner sowie im Beton konnte nicht beobachtet werden.

8.2 Versuche bei einer Linertemperatur von 70 °C

- Temperaturmessung -

Die sich während des Aufheizens und im stationären Temperaturzustand der Modellwand ergebenden Temperaturen am Liner, am Ende des Kopfdübelbolzens und im Beton wurden mit den im Kap. 5.1 beschriebenen Meßstellen erfaßt. Die Aufzeichnung der Meßwerte erfolgte durch einen Mehrfach-Punktendrucker. Zur Kompensation der Umgebungstemperatureinflüsse war dem Drucker eine elektronische Ausgleichseinrichtung (Bezugstemperatur 0 °C) vorgeschaltet.

Im mittleren Teil der Abb. 21 sind die bei stationärem Temperaturzustand gemessenen Temperaturen für den Schnitt 'A-B' und das Bolzenende dargestellt. Über dem Diagramm ist die Positionierung der Temperaturmeßstellen eingezeichnet.

Rechnungen mit dem Finite-Element-Programm SMART zur Überprüfung des gemessenen Temperaturprofils im Beton ergaben eine sehr gute Übereinstimmung der Meßwerte mit den Rechenergebnissen. Die Temperatur des Bolzenendes ist etwas höher als die des ihn umgebenden Betons (s. Meßpunkt 6). Im unteren Teil der Abb. 21 sind die berechneten Temperaturisolinien in der Umgebung des Bolzens dargestellt. Die Beeinflussung der Temperaturverteilung im Beton durch den Bolzen ist gering.

- Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung -

Durch die Aufheizung des Versuchsmodells wurde ein Teil des in den Betonporen gebundenen Wassers freigesetzt. Bei Inbetriebnahme der Absauganlage gelangte der Wasserdampf in das Leitungssystem und in die Armaturen, wo er auskondensierte. Zum Schutz des Heliumdetektors war eine Absaugung des Wassers erforderlich. Die Kanalventile wurden tränergaseintrittsseitig geschlossen und die Absauganlage mit beiden Pumpen auf den Hauptsammler geschaltet, aus dem dann das anfallende Wasser abgezogen wurde. Der Trocknungsprozeß dauerte drei Wochen, wobei einige Liter Wasser anfielen. Danach konnte keine Feuchtigkeit mehr in der Absauganlage und in den Leckagegaskanälen festgestellt werden.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Während des Trocknungsprozesses wurden für sämtliche Lecks die Heliumeinspeiseraten bei 2 bar Vordruck bestimmt. Die Raten lagen im Bereich 0,1 bis 20,72 Pa m³/s Helium. Die Einspeiseraten für das kalte, thermisch noch nicht beanspruchte Versuchsmodell lagen bei gleichem Druck zwischen 10⁻⁴ und 16,41 Pa m³/s.

Es zeigte sich, daß vor allem die im kalten Zustand (Linertemperatur ca. 20 °C) relativ undurchlässigen Lecks nach der Aufheizung erheblich höhere Einspeiseraten aufwiesen. Vermutlich wurde durch die Aufheizung die Haftung zwischen Beton und Liner im Bereich dieser Leckstellen gestört. Die Meßwerte sind aus Tabelle 3 (Spalte 2) ersichtlich.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Die Messungen zur Linerleckortung ergaben, daß mit dem auf dem Liner befindlichen Kanalsystem eine Ortung immer möglich war. Bei dem etwas linerentfernt liegenden Kanalsystem im Beton war eine Ortung nicht immer möglich. Ein Grund hierfür liegt in der Tatsache, daß durch die Aufheizung der Liner-Beton-Kontakt gestört worden ist und somit das Helium sich großflächig direkt am Liner ausbreiten konnte.

Im einzelnen ergab sich bei den Messungen für die horizontalen, nur 100 mm vom Liner entfernt im Beton liegenden Kanäle eine nicht so häufige Fehlortung wie bei den 300 mm zurückliegenden vertikalen Kanälen. Eine typische Messung, bei der eine Fehlortung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Kanalrichtung vorliegt, gibt die Abb. 22 wieder. Hier wird die Lecklage als zwischen dem H1- und H2-Kanal befindlich ermittelt, tatsächlich wurde jedoch zwischen dem H2- und H3-Kanal eingespeist. In vertikaler Richtung zeigen die Kanäle V2 und V5 die höchste Leckrate, tatsächlich liegt jedoch der V3-Kanal direkt hinter der Einspeisestelle. (Beim Betrachten der Abbildung ist die perspektivische Darstellung zu beachten, der angekreuzte Einspeiseort liegt scheinbar zwischen dem V2- und V3-Kanal, tatsächlich liegt er jedoch direkt vor dem V3-Kanal; s. auch Abb. 6).

Eine Aussage, welche Größenordnungen Fehlortungen durch ein solches, linerentfernt angeordnetes Kanalsystem annehmen können, ist im vorliegenden Fall bei den Abmessungen der Versuchsmodellwand von 2 m x 2,5 m nicht möglich.

Abschließend sei erwähnt, daß die Messungen überwiegend an denjenigen Einspeisestellen durchgeführt wurden, die schon bei den ersten Leckortungsmessungen (Linerwandtemperatur ca. 20 °C) als Einspeisestellen dienten, um somit im direkten Vergleich eine Aussage über Änderungen des Kontaktzustandes Liner/Beton und Änderungen der Gasdurchlässigkeit des Betons zu erhalten.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

In gleicher Weise (2 bar Einspeisedruck) wie schon bei den Versuchen ohne Beheizung der Wand (s. Kap. 8.1) wurden Messungen zum Druckaufbau im Spalt zwischen Liner und Betonkörper und im angrenzenden Beton durchgeführt. Auch hier zeigte sich, daß der Druck entlang des Liners (s. auch Abb. 23, Leck-Nr. 15, 16, 17) sehr schnell abfiel, und zwar in etwas stärkerem Maße als bei den Messungen an dem unbeheizten Modell. Daraus ist, wie auch aus den gestiegenen Einspeiseraten (Tab. 3, Spalte 2) deutlich erkennbar, daß durch die Erwärmung des Liners die Grenzfläche Liner/Beton durchlässiger geworden ist. Auch hier ergab sich kein nennenswerter Einfluß auf die Meßwerte durch Absperren oder Öffnen der Kanalsysteme.

Bei den anschließend durchgeführten Messungen zum Druckaufbau im Beton stellte sich entgegen den Ergebnissen aus den Messungen bei unbeheizter Wand nun ein meßbarer Druck im Beton ein. Im einzelnen ergaben sich an den Druckmeßstellen bei einem Einspeisedruck von 2,0 bar_{abs} und einer Einspeisedauer von ca. 20 h die aus Abb. 23 ersichtlichen Meßwerte, wobei die oberen Werte in den Datenkästchen bei geschlossenem Leckortungskanalsystem und die unteren Werte bei offenem Kanalsystem gemessen wurden. Der Einfluß eines offenen oder geschlossenen Kanalsystems ist gering. Des weiteren zeigen die Meßwerte deutlich, daß der Beton örtlich sehr stark unterschiedliche Gasdurchlässigkeit aufweist, da teilweise im linernahen Beton ein geringerer Druckanstieg gemessen wurde als in linerentfernteren Bereichen. Zu-

sätzlich ist auch die unterschiedliche Dauer des Druckanstieges bis zum Erreichen seines stationären Wertes (in Abb. 23 über den Kästchen stehend) ein Indiz für die lokal stark schwankende Gasdurchlässigkeit. Das Durchlässigerwerden des Betons ist zurückzuführen auf das teilweise Ausdampfen des Porenwassers und vermutlich auch auf bei der Aufheizung entstandene Risse im Beton, was auch das häufige Mißlingen der Leckortung durch das linerentfernt im Beton angeordnete Kanalsystem erklären würde.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Ein Teil des in den Betonporen gebundenen Wassers wird freigesetzt und damit der Beton gasdurchlässiger.
- Die Einspeiseraten, vor allem die der vor der Aufheizung relativ undurchlässigen Leckorte, weisen erheblich höhere Raten auf. Dies ist nur zum Teil mit der besseren Gasdurchlässigkeit des Betons zu begründen, es deutet auch auf eine Ausweitung der Störung des Liner/Betonkontaktes hin.
- Detektion und Ortung sind mit dem direkt am Liner befindlichen Kanalsystem immer möglich. Bei dem linerentfernt angeordneten Kanalsystem ergeben sich, abhängig vom Einspeiseort, mehrmals Fehlortungen.
- Im Beton ist bei Gaseinspeisung ein lokal stark unterschiedlicher Druckanstieg feststellbar, da der Beton gasdurchlässiger wurde, was auf Ausdampfen von Porenwasser und eventuell auf Rißbildung im Beton zurückzuführen ist.

8.3 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur

Nach Beendigung der Versuche während der ersten Heizphase wurde die Heizung außer Betrieb gesetzt, so daß sich die Wand langsam auf Raumtemperatur abkühlte. Im kalten Zustand (ca. 20 °C) wurden nun Messungen durchgeführt und mit den vorangegangenen Messungen verglichen, so daß Aussagen über die durch die Beheizung eingetretenen Änderungen des Betons und des Betons/Stahlkontaktes ermöglicht wurden.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Die Messungen erfolgten bei einem Einspeisedruck von 1,5 bar, 2,0 bar und 2,5 bar_{abs}, wobei die Meßwerte der 2,0 bar Messung mit den Werten der vorangegangenen, bei gleichem Druck gemessenen Werten verglichen wurden.

Bei den meisten Leckorten ergab sich nach der bei 70 °C erfolgten Teilentwässerung des Betons und der Abkühlung des Modells eine etwas höhere Einspeiserate als bei warmer, nichtentwässelter Wand; bei einigen Leckorten waren jedoch auch kleinere festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sowohl das teilweise Ausdampfen des in den Betonporen gebundenen Wassers als auch die Änderung des Liner/Betonkontaktes die Einströmraten beeinflusst. Durch die Abkühlung kann ein Wiederanlegen des Liners an den Beton erfolgen, wodurch die Einströmraten reduziert werden (vgl. Kap. 8.10). Insgesamt gesehen lagen die Einspeiseraten bei abgekühltem Zustand des Modells in etwa gleicher Größenordnung wie im warmen Zustand (Bereich 0,14 - 23,28 Pa m³/s Helium bei 2 bar, gegenüber 10⁻¹⁴ - 16,41 Pa m³/s im ursprünglichen Zustand vor der Beheizung).

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Die acht Linerleckörtungsversuche brachten die gleichen Ergebnisse wie die Versuche im warmen Zustand.

Die Ortung der bespeisten Lecks gelang mit dem Kanalsystem auf dem Liner immer. Bei dem System mit den linerentfernt im Beton angeordneten Kanälen ergaben sich fast bei jeder Messung Fehlortungen. Vermutlich liegen im Beton einzelne oder Häufungen von teilweise entwässerten Porennestern oder auch durch die Beheizung entstandene spannungsinduzierte Risse vor. Das hat ein lokal stark unterschiedliches Eindringen von Leckagegas in den Beton zur Folge, so daß mit dem Kanalsystem im Beton nur dann eine Leckortung gelang, wenn in Leckorte eingespeist wurde, in deren Nähe Kanäle lagen, die über durchlässigere Betonbereiche eine gute Verbindung zum Liner besitzen.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Die Messungen zur Druckverteilung im Modell infolge Gaseinspeisung in die Leckbohrungen erbrachten die gleichen Ergebnisse wie die Versuche mit einer Linertemperatur von 70 °C. Die Abweichungen der Meßwerte aus den Messungen der beiden Modellzustände waren äußerst gering.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Die Gaseinspeiseraten in die Linerleckstellen lagen etwa in gleicher Größenordnung wie bei den Messungen im beheizten Zustand (70 °C Linertemperatur).
- Linerleckortung gelang mit dem Kanalsystem auf dem Liner immer, mit dem System im Beton selten.
- Der Druckaufbau im Beton und am Liner bei Gaseinspeisung in die Leckorte erbrachte ebenfalls keine Änderung gegenüber den Messungen bei aufgeheizter Modellwand.

8.4 Temperaturzyklieren des Modells (Linertemperatur: Raumtemperatur/70 °C)

Die Messungen wurden durchgeführt, nachdem der Liner dreimal auf 70 °C aufgeheizt und wieder abgekühlt worden ist, wobei das Hoch- bzw. Abfahren der Wandtemperaturen erst nach dem jeweiligen Erreichen stationärer Temperaturzustände des Modells erfolgte. Nach dem dritten Zyklus wurde der Liner erneut auf eine Temperatur von 70 °C gebracht und die Versuche begonnen, deren Ergebnisse mit denen der vorangegangenen Messungen verglichen werden.

- Temperaturmessungen -

Die Temperaturmessungen beschränkten sich hier im wesentlichen auf Messungen zur Kontrolle der Temperaturzustände des Modells bei den einzelnen Aufheiz- und Abkühlvorgängen. Eine Messung des sich bei 70 °C einstellenden Temperaturprofils in der Modellwand ergab keine Temperaturunterschiede zu den vorangegangenen Messungen (Abb. 21).

- Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung -

Nachdem schon bei dem erstmaligen Aufheizen des Versuchsmodells auf eine Linertemperatur von 70 °C aus dem linernahen Beton Wasser freigesetzt worden war (s. Kap. 8.2) fiel trotz der damaligen dreiwöchigen Trocknung diesmal erneut Wasser in den Leckortungskanälen an. Es scheint so, daß nach der Abkühlung der Wand die Porenwasserfront des Betons aus den kältergebliebenen, linerentfernteren Bereichen wieder in die schon teilentwässerten Bereiche am Liner zurückgewandert ist. Durch das erneute Aufheizen der Wand verdampfte dieses Wasser. Vor den Leckortungsmessungen wurde daher eine Trocknung des Betons erforderlich, die in gleicher Weise, wie schon in Kap. 8.2 beschrieben, erfolgte. Nach dreiwöchigem Absaugen der Kanäle, wobei ca. 3 l Wasser aus dem Beton anfielen, konnte die Trocknung beendet werden, da keine Feuchtigkeit mehr in den Leitungen festgestellt wurde.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Messungen zur Bestimmung der Gaseinspeiseraten in das Versuchsmodell erfolgten auch hier bei 1,5 bar, 2,0 bar und 2,5 bar Einspeisedruck, wobei die Messungen bei 2 bar Druck als Referenz anzusehen sind und hier mit den vorangegangenen Messungen verglichen werden.

Die Gaseinspeiserate nahm im Laufe der gesamten Versuche im Mittel ständig mehr oder weniger stark zu. Ein bei allen Lecks großer Zuwachs der Einspeiserate trat hier, also bei 70 °C Linertemperatur und nach dreimaligem Temperaturzyklieren auf. Dies ist zum einen auf das erneute Ausdampfen eines Teils des Betonporenwassers zurückzuführen, zum anderen deutet es auf eine wesentliche modellbedingte Erweiterung des Spaltes zwischen Liner und Beton hin. In folgender Liste soll nochmals verdeutlicht werden, in welchen Bereichen sich der Anstieg der Einspeiseraten nach den bisherigen Temperaturzuständen des Versuchsmodells bei jeweils gleichem Einspeisedruck von 2,0 bar_{abs} und einer Einspeisegastemperatur von ca. 20 °C bewegte:

- Linertemperatur: Raumtemperatur (ca. 20 °C),
Versuchsmodell thermisch noch nicht beansprucht
Einspeiserate max. 16,41 Pa m³/s, min. 10⁻⁴ Pa m³/s
(s. Kap. 8.1).
- Linertemperatur: 70 °C,
erste Aufheizung des Versuchsmodells,
Einspeiserate max. 20,72 Pa m³/s, min. 0,1 Pa m³/s
(s. Kap. 8.2).
- Linertemperatur: Raumtemperatur (ca. 20 °C),
nach erster Aufheizung des Versuchsmodells,
Einspeiserate max. 23,28 Pa m³/s, min. 0,14 Pa m³/s
(s. Kap. 8.3).
- Linertemperatur: 70 °C,
nach dreimaligem Temperaturzyklieren des Versuchsmodells
(Raumtemperatur 70 °C),
Einspeiserate max. 36,67 Pa m³/s, min. 0,46 Pa m³/s.

Die einzelnen Daten über die Zunahme der Einspeiseraten (nach dem Temperaturzyklieren) in die Linerleckbohrungen sind den Abb. 16 und 17 (gestrichelte Linie) und der Tabelle 3 (Spalte 4) zu entnehmen.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Die Messungen zur Linerleckortung an vier verschiedenen Lecks bei 1,5 und 2,0 bar Einspeisedruck bestätigten die sich schon in den vorangegangenen Messungen andeutende Tendenz, daß mit zunehmenden temperaturbedingten Belastungen des Modells die Gasdurchlässigkeit des Betons sowie der Spalt zwischen Liner und Beton größer werden und somit eine ausreichend genaue Leckortung für das linerentfernt im Beton angeordnete Kanalsystem mehr oder weniger vom Zufall abhängig wird.

Mit dem Kanalsystem auf dem Liner gelang eine Ortung des Lecks immer, während das linerentfernte Betonkanalsystem Fehlortungen ergab.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Die Versuche erbrachten keine nennenswerte Änderung der Meßwerte gegenüber den Messungen vorher.

Zu berücksichtigen ist, daß die Druckmeßstellen im Beton nur einen sehr kleinen Modellbereich erfassen (horizontal, punktuell in einer Ebene gestaffelt, s. Abb. 10), so daß durchaus andere Meßergebnisse in anderen Betonbereichen denkbar sind, worauf auch das bevorzugte Eindringen von Leckagegas in einige Betonkanäle (s. Abb. 22) bei den Leckortungsmessungen hindeutet.

Der Druck an den Nachbarlecks der Einspeisestelle blieb seit dem erstmaligen Aufheizen ebenfalls unverändert, wogegen die Einstromraten in die Lecks zunahm. Es scheint, daß sich der Spalt zwischen Liner und Beton nach jeder Modellzustandsänderung erweitert, diese Erweiterung jedoch nicht zu wesentlichen Druckänderungen an der Grenzfläche Stahl/Beton, insbesondere bei den hier vorliegenden Einspeisedrücken von 2 bar, führt.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Die Porenwasserfront des Betons ist vermutlich während der Kaltphase des Modells in Richtung Liner zurückgewandert, so daß trotz dreiwöchigen Trocknens während der ersten Heizphase diesmal erneut Wasser freigesetzt werden konnte.
- Die Einspeiseraten in die Leckagebohrungen des Liners nahmen stark zu, was im wesentlichen auf eine bessere Gasdurchlässigkeit der Grenzfläche Liner/Beton zurückzuführen ist.
- Eine Linerleckortung gelang mit dem Kanalsystem auf dem Liner immer, mit dem linerentfernt im Beton angeordneten System ergaben sich Fehlortungen.
- Bezüglich des Druckaufbaus im Bereich zwischen Liner und Beton und im Beton selbst zeigten sich keine nennenswert anderen Ergebnisse gegenüber den Messungen unter den beiden vorangegangenen Versuchsbedingungen.

8.5 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur und Messungen im kalten Zustand

Nach Beendigung der Messungen bei 70 °C Liner-temperatur erfolgten auch Messungen bei auf Raumtemperatur (ca. 20 °C) abgekühltem Versuchsmodell.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Messungen der Leckeinspeiseraten ergaben für den größten Teil der Lecks kleinere Werte als bei 70 °C Linertemperatur (s. Tab. 3, Spalte 5). Es wurde bei der Aufheizung des Liners auf 70 °C durch die etwas unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und Beton der Liner durch seine Ankerbolzen vorgeschoben, so daß der Spalt zwischen Liner und Beton vergrößert wurde. Nach der Abkühlung wurde dieses Vorschieben teilweise wieder rückgängig gemacht, so daß der Liner wieder etwas besser am Beton anlag.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Die Leckortungsmessungen wurden auf eine Kontrollmessung beschränkt, da mit anderen Ergebnissen als bei den Versuchen bei 70 °C Linertemperatur nicht zu rechnen war.

Die Kontrollmessung zeigte dann auch das gleiche Ergebnis wie bisher. Die Ortung des Lecks gelang mit dem Kanalsystem auf dem Liner gut, mit dem linerentfernten Kanalsystem mißlang der Ortungsversuch.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Auch diesmal lagen die Meßwerte im Bereich der Werte, die sich bei der Messung nach der erstmaligen Aufheizung ergeben hatten. Daraus wird - wie auch schon aus den Messungen zur Leckeinströmraten und zur Leckortung - deutlich, daß entscheidende Veränderungen der Gasdurchlässigkeit des Betons und in der Grenzfläche zwischen Liner und Beton durch die erstmalige Aufheizung des Liners auf 70 °C entstanden sind und die nachfolgende Temperaturzyklisierung keine wesentlichen Änderungen gebracht hat.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Die Gaseinspeiseraten in die Lecks werden kleiner, blieben insgesamt gesehen jedoch im Bereich der Werte wie bei der 70 °C heißen Wand.
- Die Messungen zur Linerleckortung erbrachten die gleichen Ergebnisse wie nach der ersten Aufheizung der Wand.

- Die Druckmessungen erbrachten ebenfalls die gleichen Ergebnisse, wie sie schon bei beheizter Wand gemessen wurden.

8.6 Aufheizen des Liners auf 120 °C

Im nächsten Schritt wurde die Linertemperatur auf 120 °C angehoben. Diese Temperatur liegt in der Größe der bisher für Linerheistellen im Normalbetrieb eines HTR mit kaltgehendem Liner als maximal zulässig genannten Temperaturen.

Die Aufheizung erfolgte in einer ersten Stufe bis auf ca. 70 °C und nach einer Pause von 48 h in einer zweiten Stufe bis auf 120 °C. Die Aufheizgeschwindigkeit blieb auch hier unter 5 °C/h. Während der Aufheizphase wurden bei geschlossenen Kanalventilen Druckmessungen im Beton sowie im Kanal H8 durchgeführt, um einen möglicherweise durch Verdampfen des Betonwassers entstehenden Druckanstieg zu erfassen.

- Temperaturmessungen -

Die sich während der Aufheizung des Modells auf 120 °C bis zum Erreichen stationärer Temperaturzustände ergebenden Liner-, Bolzen- und Betontemperaturen wurden überwacht und durch einen Mehrfach-Punktendrucker geschrieben. Die Temperaturen an der Rückseite (kalte Seite) der Modellwand erreichten etwa 45 °C, während sich für den in Linernähe liegenden Beton Temperaturen von über 100 °C ergaben.

- Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung -

Bedingt durch die hohen Betontemperaturen im Bereich des Liners kam es zu einem nochmaligen, jedoch wesentlich intensiveren Ausdampfen von im Beton gebundenem Wasser, so daß ein erneutes Absaugen erforderlich wurde. Der Wasserdampf strömte dabei gegen das Temperaturgefälle im Beton, auf den Liner zu und gelangte in die Leckortungskanäle. Der anfallende Wasserdampf wurde in gleicher Weise wie schon im Kap. 8.2 beschrieben auskondensiert und das anfallende Wasser abgelitert.

In einem Zeitraum von etwa 3 1/2 Monaten wurden insgesamt 48 l Wasser über die Kanäle der linerseitig auf 120 °C gehaltenen

Wand abgezogen. Die Abb. 24 zeigt die kumulierte Wassermenge S [l] über der Absaugzeit t [h] aufgetragen. Den Meßwerten wurde eine Funktion der Form $t/(a+bt)$ angepaßt. Dabei ergaben sich für $a = 2,84$ und $b = 0,02177$ (Asymptote $S = 1/b = 46$ l). Die am Liner anfallende Wasserdampftrate dS/dt zur Zeit $t = 0$ ergibt sich zu $dS/dt = 1/a = 0,35$ l/h bzw. bezogen auf 1 m^2 der 5 m^2 großen Linerfläche $1/F dS/dt_{t=0} = 0,07 \text{ l/m}^2 \text{ h}$. Ein merklicher Druckaufbau durch die Dampfbildung wurde nicht beobachtet.

Bei Versuchen mit linerbedeckten Betonsegmenten, die im Zusammenhang mit Störfalluntersuchungen des SNR 300 Kalkar durchgeführt worden sind, wurden bei Linertemperaturen von $170 \text{ }^\circ\text{C}$ und $220 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Anfangsphasen Wasserdampfraten von $0,25$ und $0,55 \text{ l/m}^2 \text{ h}$ gemessen.

Die hier bestimmte Rate von $0,07 \text{ l/m}^2 \text{ h}$ ist um einiges kleiner, weil der Beton wegen der langen Standzeit und den vorangegangenen Heizphasen schon vorgetrocknet war und die Temperatur niedriger ist.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Die Abb. 17 und die Tabelle 3 (Spalte 6) zeigen die gemessenen Einspeiseraten bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$ Linertemperatur im Vergleich zu den Raten, die bei vorangegangenen Zuständen des Liner-Beton-Segments gemessen worden waren. Eine deutliche Erhöhung (beachte in der Abbildung die log. Skala) der Einspeiseraten war für alle Lecks zu verzeichnen. Dies war bei der großen Ausdampftrate des Betonporenwassers und der damit verbundenen höheren Gasdurchlässigkeit des Betons zu erwarten. Zudem hat sich sehr wahrscheinlich auch der Spalt zwischen Beton und Liner vergrößert.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Eine Leckortung über das Kanalsystem am Liner war immer möglich. Jedoch im Unterschied zu früheren Messungen zeigte die Gasratenverteilung über die Kanäle nicht mehr ein so ausgeprägtes Maximum. Für das im Beton liegende Kanalsystem war die Ortung, wie auch schon bei den vorherigen Versuchen nicht immer möglich (vor allem, was die am weitesten vom Liner entfernt liegenden Kanäle anbetraf).

Der Beton war durch die Entwässerung bei 120 °C durchlässiger geworden, so daß die in den Kanälen gemessenen Heliumraten erheblich höher lagen als bei früheren Messungen.

Es zeigte sich auch hier wieder deutlich (wie schon aus Abb. 22 bei einer Linertemperatur von 70 °C ersichtlich), daß einige der linerentfernt im Beton liegenden Kanäle wesentlich schlechteren Kontakt zur Grenzfläche Liner-Beton besitzen als andere, so daß die Fehlortungen mit vermutlich im Beton entstandenen Rissen, Häufungen von entwässerten Großporen oder dergleichen zu erklären sind.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton infolge Gaseinspeisung -

Die Druckmessung an der Grenzfläche Liner/Beton erbrachte keine nennenswert anderen Ergebnisse als die bei allen bisher, nach der ersten Aufheizung der Wand durchgeführten Messungen.

Hinsichtlich des Druckaufbaues im Beton ergab sich jedoch nun, bedingt durch die erneute Entwässerung der Betonporen, eine weiter in den Beton hineinreichende Zone mit überwiegend höheren Drücken als bei den vorangegangenen Messungen (Abb. 25). Die allgemein gestiegene Gasdurchlässigkeit des Betons führte auch zu einer erheblichen Verkürzung der Einspeisedauer bis zum Erreichen stationärer Druckwerte an den Meßstellen.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Gegenüber der Aufheizung auf 70 °C werden erheblich größere Mengen (ca. 48 Liter) Betonwasser freigesetzt.
- Die Einspeiseraten in die Linerleckbohrungen sind erheblich gestiegen, was zum einen durch den Wasserentzug und der damit verbundenen höheren Gasdurchlässigkeit des Betons, zum anderen mit einer Zunahme des Spaltes zwischen Liner und Beton zu begründen ist.
- Die Linerleckortung war mit dem Kanalsystem auf dem Liner immer möglich - mit dem linerentfernten System, auch bei der hier vorliegenden, erheblich gestiegenen Gasdurchlässigkeit des Betons, ergaben sich überwiegend Fehlortungen.
- Die im Beton entstehenden Gasdrücke steigen an.

8.7 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur (ca. 20 °C) und Messungen im kalten Zustand

Im Anschluß an die Meßserie bei 120 °C Linertemperatur wurde die Heizung abgeschaltet, so daß die Wand langsam auf Raumtemperatur abkühlte.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Messungen der Leckeinspeiseraten ergaben für den größten Teil der Lecks kleinere Werte als bei 120 °C Linertemperatur (siehe Tabelle 3, Spalt 7), da sich durch die Abkühlung der Spalt zwischen Liner und Beton verringerte und der Liner wieder besser am Beton anlag.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Die an 10 Einspeisestellen durchgeführten Leckortungsmessungen mit dem Beton- und dem Linerkanalsystem erbrachten ähnliche Ergebnisse wie bei heißer Wand. Die Leckortung gelang mit dem Kanalsystem auf dem Liner immer, mit dem System im Beton ergaben sich meistens Fehlortungen. Die Leckortung wird überwiegend bestimmt durch die sich schon nach dem ersten Aufheizen der Wand im Beton und an der Grenzfläche Liner/Beton eingestellten Verhältnisse, so daß auch für die noch folgenden Leckortungsmessungen im wesentlichen unveränderte Ergebnisse zu erwarten sind.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton infolge Gaseinspeisung -

Die Abweichungen der Meßergebnisse von den Meßwerten aus den Versuchen bei 120 °C Linertemperatur sind so gering, daß die in Kap. 8.6 gemachten Aussagen und die in Abb. 25 dargestellten Ergebnisse in gleicher Weise gelten.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Die Leckeinspeiseraten lagen größtenteils etwas unter den bei 120 °C Linertemperatur gemessenen Werten, was auf eine

Verringerung des Spaltes zwischen Liner und Beton infolge der Abkühlung zurückzuführen ist.

- Linerleckortung gelang mit dem Kanalsystem auf dem Liner immer, mit dem Liner entfernt im Beton angeordneten System selten.
- Die Messungen zum Druckaufbau im Beton und am Liner ergaben keine nennenswerte Differenz zu den Messungen bei 120 °C Liner-temperatur.

8.8. Temperaturzyklieren des Modells (Liner-temperatur:Raum-temperatur/120 °C)

Der Liner wurde dreimal auf 120 °C aufgeheizt (Aufheizgeschwindigkeit 5 °C/h) mit jeweils anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur. Jede Abkühlung bzw. Aufheizung erfolgte erst dann, wenn stationäre Temperaturen in der Betonwand erreicht worden waren. In der heißen Phase des letzten Zyklus wurden Leckeinspeiseraten ermittelt sowie Messungen zur Leckortung durchgeführt.

- Temperaturmessungen -

Die Temperaturmessungen beschränkten sich auf Messungen zur Überwachung des Modells bei den einzelnen Aufheiz- und Abkühlvorgängen.

- Wasser- bzw. Wasserdampffreisetzung -

In den Kanälen wurde wiederum Wasserdampf festgestellt. Das deutet darauf hin, daß in der kalten Phase zwischen erstmaliger Aufheizung auf 120 °C und dem jetzigen dreimaligen Zyklieren Wasser in den getrockneten Beton zum Liner gelangt ist. Daher wurde eine erneute Trocknung des Betons erforderlich, die über einen Zeitraum von sieben Tagen erfolgte, wobei ca. 1,5 l Wasser aus dem Beton abgezogen wurden.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Die Größe der Leckeinspeiseraten nahm nach der Temperaturzyklierung gegenüber den nach der ersten Aufheizung auf 120 °C gemessenen Werten nochmals zu. Das ist auf Änderung des Spaltes zwischen Beton und Liner durch die Beheizung zurückzuführen. Die Daten der

Messungen sind im Anhang in Tabelle 3 (Spalte 8) zusammengestellt.

- Leckagegas einströmrate in die Kanäle -

Hinsichtlich der Leckortung traten keine erwähnenswerten Änderungen in den Ergebnissen gegenüber denen aus den vorangegangenen Messungen (ausgehend von der erstmaligen Beheizung des Modells) auf.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Auf Druckmessungen wurde verzichtet, da keine anderen Ergebnisse als bisher zu erwarten sind.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- In den Leckortungskanälen wurde wiederum Wasserdampf festgestellt und ca. 1,5 l Wasser aus dem Beton abgezogen.
- Die Einspeiserate in den Linerleckbohrungen ist erneut angestiegen, was auf ein weiteres temperaturbedingtes Abheben des Liners vom Beton hindeutet.
- Die Leckortung gelang mit dem System auf dem Liner gut, mit dem linerentfernten Betonkanalsystem ergaben sich nur Fehlortungen.

8.9 Abkühlen des Liners auf Raumtemperatur (ca. 20 °C) und Messungen im kalten Zustand

Nach dem dreimaligen Temperaturzyklieren des Modells und den anschließenden Messungen bei 120 °C Linertemperatur wurde die Heizung abgeschaltet, so daß das Modell langsam auf Raumtemperatur abkühlte. Das bisher übliche Meßprogramm wurde hier stark reduziert, da keine gravierend anderen Ergebnisse als bisher zu erwarten waren.

Messungen erfolgten hier zur Bestimmung der Einspeiseraten in die Leckbohrungen sowie für jedes Kanalsystem je einmal zur Leckortung.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Die Einspeiseraten gingen gegenüber den Werten bei der heißen Wand wiederum zurück, wie sie sich auch schon vorher bei den Kaltmessungen nach dem erstmaligen Heizen auf 120 °C Linertemperatur ergeben hatten. Dies wird durch die Änderung der Spaltweite zwischen Liner und Beton verursacht, die sich beim Erkalten wieder verringert. Im Vergleich mit den Werten bei der kalten Wand nach der erstmaligen Aufheizung auf 120 °C zeigte sich, daß das Temperaturzyklieren nochmals eine Erhöhung der Gasdurchlässigkeit der Modellwand gebracht hatte. Ein direkter Vergleich der Einspeiseraten ist mittels Tabelle 3 möglich, da in ihr die Meßwerte aus allen Einspeiseratenmessungen aufgelistet sind.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Wie schon eingangs im Kap. 8.9 erwähnt, erfolgte je Kanalsystem nur eine Messung, und zwar mit demjenigen Leck als Einspeiseort (Leck Nr. 15) mit dem bei allen vorangegangenen Messungen Versuche zur Leckortung durchgeführt worden waren. Die Messungen erbrachten das erwartete Ergebnis: Leckortung mit dem Kanalsystem auf dem Liner gelungen, mit dem linerentfernt angeordneten Kanälen nicht gelungen.

- Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse -

- Bei abgekühlter Wand ergeben sich gegenüber der heißen Wand geringere Einspeiseraten, was deutlich macht, daß sich an der Grenzfläche Liner/Beton temperaturabhängige, veränderliche Spaltweiten einstellen.
- Die Linerleckortung brachte keine Veränderung zu den vorherigen Messungen. Die nach der ersten Aufheizung der Wand (70 °C) entstandenen Pfade prägten sich mehr und mehr aus, was zwar zu höheren Leckgasraten in den Kanälen führte, jedoch die Funktionsfähigkeit der Leckortung nicht beeinflusste.

8.10 Anpressen des Liners um ein ausgesuchtes Leck

Untersucht werden sollte, inwieweit ein Andrücken des Liners an den Beton (im Reaktor wird der Liner sowohl durch den Innendruck

als auch durch die Kontaktpressung zwischen Liner und Beton infolge Verspannung, Kriechen, Schwinden u.a. angepreßt) einen Einfluß auf die Leckeinströmraten und auf die Leckortung hat. Zu diesem Zweck wurde die im Kap. 5.1 beschriebene Anpreßvorrichtung, die es ermöglicht, den Liner über eine Druckplatte von 300 mm \varnothing örtlich an den Beton anzudrücken, installiert. Die Isolierung und die Heizmatten wurden vor der Montage der Vorrichtung entfernt, so daß die Druckplatte direkt am Liner angebracht werden konnte. Die Messungen erfolgten also bei unbeheizter Linerwand.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Am Leckort wurde ein konstanter Gasdruck eingestellt, der Anpreßdruck kontinuierlich erhöht und in Abhängigkeit vom Anpreßdruck die Gaseinspeiserate ermittelt. Bei allen Messungen ergab sich bei steigendem Anpreßdruck eine sinkende Durchlässigkeit der Leckorte, wobei der Gradient der Durchlässigkeitsabnahme von Leckort zu Leckort verschieden war.

Für verschiedene Lecks zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten. An einer Leckstelle wurde beim Hochfahren des lokalen Anpreßdruckes auf etwa 28,5 bar eine Abnahme der Einspeiserate um rd. 30 % verzeichnet. An einer anderen Leckposition ging die Rate bei der gleichen Prozedur um einen Faktor 15 zurück und wieder bei einer anderen gar um den Faktor 33. Dies ist, was bereits des öfteren erwähnt wurde, auf den Einfluß der lokal sehr unterschiedlichen Weite des Spaltes zwischen Liner und Beton zurückzuführen. Die Meßwerte sind in den Abbildungen 26 und 27 grafisch dargestellt.

Durch das Anpressen des Liners an den Beton wurde es auch möglich, mit höheren Einspeisedrücken am Leckort zu operieren. Es wurden Gasdrücke am Leck bis 20 bar eingestellt. Die größte bei diesem Druck gemessene Einspeiserate betrug $135 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (Gaseinspeisedruck = Lineranpreßdruck). Insgesamt fanden Messungen bei folgenden Drücken statt:

	<u>Lineranspreßdruck</u>	<u>Gaseinspeisedruck</u>
a)	ohne Anpressen	2 bar _{abs}
b)	zwischen 1-28,5 bar _{abs}	2 bar _{abs}
c)	28,5 bar _{abs}	zwischen 1-20 bar _{abs}
d)	zwischen 1-20 bar _{abs}	" 1-20 bar _{abs}

Bei den Messungen zu 'd' wurde jeweils der Anpreßdruck gleich dem des Einspeisedrucks eingestellt.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Schon die Messungen zur Gaseinspeiserate in die Leckbohrungen zeigten, daß bei Einspeisedrücken ab etwa 3 bar_{abs} fühlbare, bei Drücken über ca. 4 bar_{abs} sogar hörbare Gasströme aus den in Einspeisenähe am Liner befindlichen Kanälen austraten.

In Abb. 29 ist die Gasströmung aus lecknahen Kanälen durch die Bewegung kleiner Papierstreifen, die an einem Stab befestigt sind, sichtbar gemacht. Bei den höheren Einspeisedrücken wurde zur Reduzierung des Gasverbrauchs eine Methode zur schnelleren Bestimmung der Gasaustrittsraten aus den einzelnen Kanälen verwendet. Die Leckortung wurde hier mit einem Flügelrad-Anemometer durchgeführt. Dabei wird die mit der Strömungsgeschwindigkeit und der Durchflußmenge linear zusammenhängende Drehzahl eines Flügelrades als elektrischer Impuls einer Elektronik zugeführt und dort in eine lineare Anzeige (Bereich von 0,3-20 m/s) umgewandelt. Die Messungen wurden bei einem Gaseinspeise- und Lineranpreßdruck von 4,6 bar durchgeführt.

Fühlbare Unterschiede der am System auf dem Liner austretenden Gasströme erlaubten bereits eine Bestimmung der Kanäle mit der höchsten Gasausströmrates von Hand. Insgesamt erbrachte die Leckortung mit dem System auf dem Liner, daß auch bei höheren Einspeisedrücken die lecknächsten Kanäle die höchste Gasauströmrates aufweisen. Gemessen wurde an drei Linerleckbohrungen mit beiden Kanalsystemen. Bei dem vom Liner entfernt im Beton befindlichen Kanalsystem traten keine fühlbaren Gasströme aus. Die Gasausströmgeschwindigkeit aus den Kanälen erreichte nur bei einem Kanal die Ansprechschwelle des Flügelrad-Anemometers. Da dieser Kanal nicht der der Einspeisestelle im Beton am nächsten liegende Kanal war, sondern ein 0,5 m entfernter Kanal also eine Fehlortung vorlag, wurde auf weitere Messungen verzichtet.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Die Messungen erfolgten bei 2 bar_{abs} Gaseinspeisedruck und stufenweise zwischen 1,0 bar_{abs} und 28,5 bar_{abs} hochgefahretem

Lineranpreßdruck. Gemessen wurde, wie schon bei den vorangegangenen Druckmessungen am Leck Nr. 16, um welches im Beton die Druckmeßröhrchen gruppiert waren.

Die Druckmessungen an der Grenzfläche Liner/Beton ergaben, wie schon bei den vorangegangenen Messungen ohne Lineranpressen, geringe Drücke an den Nachbarlecks (Abb. 23 u. 25). Mit zunehmendem Anpreßdruck sinken diese Drücke noch, so daß ab ca. 6 bar_{abs} Anpreßdruck an den benachbarten Einspeiseorten kein Überdruck mehr feststellbar ist.

Die Messungen zum Druckaufbau im Beton zeigten bei steigendem Lineranpreßdruck ebenfalls abnehmende Drücke. In der Abb. 31 sind die Drücke in Abhängigkeit vom Anpreßdruck aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, daß mit zunehmendem Abstand des Meßortes vom Einspeiseort der Einfluß des Lineranpreßdruckes abnimmt. Jedoch ist auch ersichtlich, daß der örtlich unterschiedliche Zustand des Betons dazu führen kann, daß der Meßpunkt 4, der abstandsgleich mit Meßpunkt 5 und näher am Liner als die Meßpunkte 6, 7 und 8 liegt, geringere, in diesem Fall die geringsten Drücke aufweist.

Ursache der Druckreduzierung durch das Lineranpressen ist die Verringerung des Spaltes an der Grenzfläche Liner/Beton. Es kommt rund um die Einspeisestelle zu einem besseren Anliegen des Liners an den Beton. Während bei gestörtem Liner-Beton-Verbund unter Druck stehendes Helium sich auf große Flächen ausbreitet und in den linernahen Beton eindringt, kommt es bei dicht anliegendem Liner zu einem eher punktuellen Eindringen des Heliums in den Beton, wobei sich die Einspeiseraten durch Erhöhung der Strömungswiderstände am Leckort verringern. Da die Strömungswiderstände in den Beton hinein aber im wesentlichen unverändert bleiben, vermindern sich die Drücke im Beton. Die Dränagewirkung der linernahen Kanäle zur Verhinderung von Zonen erhöhten Drucks im Beton bestätigte sich auch unter Lineranpressung. Trotz der Behinderung des Druckabbaues entlang des Liners konnten sich keine höheren Drücke als bei allen vorangegangenen Messungen einstellen.

- Zusammenfassung der Ergebnisse -
- Mit steigendem Lineranpreßdruck verengt sich der Spalt zwischen Liner und Beton, und damit verringert sich die Einspeiserate in die Leckbohrungen.
- Auch bei höheren Einspeisedrücken und bei durch Lineranpressen verringerter Leckgasausbreitung entlang des Liners ergaben sich für das Kanalsystem auf dem Liner wiederum gelungene Ortungsversuche, während mit dem Kanalsystem im Beton erneut fehlgeortet wurde.
- Die Drücke im Beton und am Liner fallen mit steigendem Anpreßdruck. Trotz höherer Einspeisedrücke stellen sich in keinem Fall höhere Drücke als bei den bisherigen Druckmessungen ein.

8.11 Vergießen des unmittelbar am Liner befindlichen Kanalsystems

In den folgenden Messungen sollte geklärt werden, inwieweit das am Liner befindliche Kanalsystem die Meßergebnisse für das weiter entfernt im Beton liegende Kanalsystem beeinflusst hat. Dazu wurde die Betonwand um ca. 30° gekippt und die horizontalen und vertikalen Kanäle des am Liner liegenden Systems mit einem Vergußmörtel verfüllt. Als Vergußmasse diente ein spezieller Mörtel der Fa. Pagel-Spezial-Beton-Fabriken mit der Typenbezeichnung V1. Dabei handelt es sich um einen Mörtel mit guter Flußfähigkeit, hoher Kraftschlüssigkeit und vor allem um einen nicht schrumpfenden Mörtel (Quellmaß + 0,5 Vol.%), so daß ein spaltfreies Ausfüllen der Kanäle gewährleistet war. Nach dem Verguß folgte eine Aushärtezeit von ca. 30 Tagen. Im Anschluß wurde die Schräglage des Versuchsmodells rückgängig gemacht und die Anschlüsse für die Messungen hergestellt.

- Gaseinspeiseraten in die Leckbohrungen -

Die Messungen zur Einspeiserate in die Leckbohrungen erbrachten für den überwiegenden Teil der Leckbohrungen eine Abnahme, für einige Lecks jedoch auch eine teilweise sogar erhebliche Zunahme der Einspeiserate. So ergab sich im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen für die weniger durchlässigen Lecks eine Abnahme der Einspeiseraten zwischen 4 % und 85 % und für die Lecks in den durchlässigeren Bereichen eine Zunahme, die von 4 % bis

hin zum 2,5-fachen reichte.

Gemessen wurde wie schon bei allen vorangegangenen Messungen bei einem Einspeisedruck von 2,0 bar_{abs}. Die Meßergebnisse sind in der Tabelle 3 (Spalte 10) zusammen mit denen der vorherigen Messungen aufgelistet. Durch das Verfüllen der Kanäle blieb zur Ableitung des Einspeisegases nur noch der Weg entlang des Spaltes an der Grenzfläche Liner/Beton und das Eindringen in den Beton selbst, so daß mit einer Abnahme der Einspeiserate gegenüber der vorangegangenen Messung gerechnet werden mußte, was für die meisten Leckbohrungen auch zutraf. Eine Ausnahme machten die Einspeisestellen, die in Bereichen lagen, in die während der Versuche unter Lineranpressen mit hohen Drücken eingespeist worden war. In diesen Bereichen haben sich anscheinend unter dem erhöhten Druck so große Pfade entlang des Liners und/oder in den Beton hinein gebildet, daß sich trotz des Wegfalls der Drainage durch die Linerkanäle noch eine Zunahme der Gaseinspeisemengen ergab.

- Leckagegaseinströmraten in die Kanäle -

Vor Beginn der Leckortungsmessungen wurde das im Beton befindliche Helium (Helium aus den vorangegangenen Messungen) abgesaugt, wobei der Absaugstrom auf seine Heliumkonzentration hin kontrolliert wurde. Erst nach Erreichen von Heliumraten im Absaugstrom, die im Bereich des Umgebungspegels lagen, wurden Leckortungsmessungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten bei 2 bar_{abs} Einspeisedruck. Eine vorherige Testmessung in den Kanälen zeigte, daß sich als Leckortungsmethode das Trägergasverfahren eignete. Leckortungsmessungen erfolgten an drei Lecks, wobei bei einem Leck die Ortung gelang, während sich bei den beiden anderen Fehlortungen ergaben. Bei der gelungenen Ortung lag der gemessene Heliumpegel in den lecknächsten Kanälen, jedoch nur geringfügig über dem Pegel der restlichen Kanäle.

Allgemein zeigte sich bei den Ortungsmessungen eine Nivellierung der Heliumraten in den Betonkanälen. Es scheint, daß durch den Verguß des Linerkanalsystems, was ja auch den Wegfall der Drainagewirkung dieser Kanäle bedeutet, sich das Helium weiträumiger entlang der Grenzfläche Liner/Beton in leckentfernere Bereiche

verteilt und somit die Möglichkeit hat, in breiterer Front in den Beton einzudringen. Es bestätigte sich auch hier wieder, daß einige Leckortungskanäle einen besseren Kontakt zum Linerbetonspalt aufweisen als andere, so daß sich zwangsläufig Fehlortungen ergaben. Inhomogenitäten des Betons sowie Risse, die im Laufe der Versuchsserie auftraten und sich mit der steigenden Belastung des Modells teilweise auch verstärkten, sind der Grund für den besseren Kontakt dieser Betonkanäle zum Liner.

In den Kanälen ergab sich ein nur sehr geringer Heliumkonzentrationsunterschied. Eine Dränage am Liner wirkt sich für eine Linerleckortung mittels Betonkanälen eher positiv als negativ aus, da ohne Dränage sich Helium fast gleichmäßig in den Beton hinein ausbreiten kann, während bei den vorangegangenen Messungen die großflächige Ausbreitung des Heliums durch die Dränagewirkung der Linerkanäle behindert wurde und sich dadurch deutlichere Unterschiede in den Leckagegaseinströmraten ergaben.

- Druckaufbau zwischen Liner und Beton und im Beton -

Die Messungen erfolgten wiederum an der Linerleckstelle Nr.16, um welche die Druckmeßröhrchen gestaffelt sind; sie wurden auch hier bei 2,0 bar_{abs} durchgeführt. Die wesentlichsten Ergebnisse sind in der Abb. 32, einmal bei geschlossenen, zum anderen bei offenen Betonkanälen dargestellt.

Die Druckmessungen nach dem Verguß des Linerkanalsystems zeigten erneut die fehlende Dränagewirkung der vergossenen Kanäle. Ein Vergleich der hier aufgeführten Messungen mit den vorangegangenen macht deutlich, daß sich wesentlich höhere Drücke an den Nachbarlecks am Liner als auch im linernahen Beton einstellen. Das Öffnen bzw. Schließen der Kanalventile während der Gaseinspeisung nahm, wie auch bei den vorherigen Messungen, keinen großen Einfluß auf den Druckpegel im Beton.

- Zusammenfassung der Ergebnisse -

- Die Vorschädigungen des Modells durch die bisherigen Versuche führten zu stark unterschiedlichen Ergebnissen für die Einspeiseraten. Der überwiegende Teil der Linerlecks ließ jedoch

nach dem Verguß der am Liner befindlichen Kanäle geringere Gas-einströmrate zu, ein Teil zeigte jedoch auch höhere Einspeise-raten.

- Eine Linerleckortung durch das Kanalsystem im Beton gelang auch ohne Beeinflussung durch Kanäle am Liner nicht in jedem Fall.
- Die Druckmessungen im Beton ließen die fehlende Dränagewir-kung der Linerkanäle erkennen, da bei gleichem Einspeisedruck nun erheblich höhere Drücke am Liner als auch im linernahen Beton vorlagen.

9 ZERSÄGEN DER MODELLWAND UND RIßUNTERSUCHUNGEN AN DEN TEIL-STÜCKEN

Zum Abschluß der Versuche wurde die Wand mit diamantbestückten Sägeblättern in vier Betonteilstücke zerlegt. An den Schnitt-flächen der so entstandenen Betonquader erfolgten visuelle Unter-suchungen mit hauptsächlichem Augenmerk auf den Zustand der Be-ton/Stahl-Grenzflächen (Liner, Bolzen, Vierkantrohrkanäle, Be-wehrung) sowie auf die Rissigkeit und Porösität des Betons (Lun-ker, Poren, Porenester u.dgl.). Die aussagekräftigsten Teilbe-reiche aus den Schnittflächen wurden fotografiert (Abb. 33-39).

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind:

- Homogenitätsstörungen in Form von Poren sind gleichmäßig über alle Bereiche der Schnittflächen verteilt und erreichen teil-weise Ausdehnungen von 10 mm (Abb. 34),
- Ausgeprägte Rißzonen mit sichtbaren, größeren Rissen traten ausschließlich im linernahen Beton, d.h. bis ca. 50 mm Abstand vom Liner auf (Abb. 35). Einzelne Risse erreichen dabei Län-gen von bis zu einem Meter, wobei Rißbreiten von bis zu 2 mm vorlagen.
- Der Kontakt zwischen Linerblech und Beton war in allen Berei-chen mehr oder weniger stark gestört. Die Spaltweiten erreich-ten auch hier Größen von bis zu 2 mm (Abb. 36). Selbst an den 'intaktesten' Gebieten war die Formschlüßtrennung zwischen Be-ton und Stahl durch einen sichtbaren Riß erkennbar (Abb. 37). Die tiefer im Beton liegenden Stahlteile wie die Kopfdübelbol-

zen und die Bewehrung wiesen einen guten Formschluß mit dem Beton auf.

- Unter den Vierkantrohren der linernahen Horizontal-Kanäle trat eine Häufung von größeren Poren (\emptyset bis zu 4 mm) auf (Abb. 38, 39). Die aufgetretenen Poren im Modell sind nicht repräsentativ für einen Spannbetonbehälter.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Leckortung

Eine Leckortung mit Kanalsystemen kann nur dann erfolgreich sein, wenn das Leckagegas auch in die dem Leckort am nächsten liegenden Kanäle gelangen kann. Die Zustände zwischen Liner und Beton und im Beton selbst, wie sie sich durch die Bauteilerrichtung, den Betonverguß, das unterschiedliche Materialverhalten, die Druck- und Temperaturbelastungen und die Betonwasserfreisetzung ergeben, sind für die Anordnung der Kanäle von Bedeutung.

Die durchgeführten Untersuchungen ließen folgende Einflüsse auf die Leckortung durch Kanalsysteme erkennen:

- Störungen des Kontaktes zwischen Beton und Liner, die sich bei der Errichtung des Versuchsmodells nicht vermeiden ließen und sich im Laufe der Temperatur- und Druckbelastungen vergrößerten und zu einer Trennung von Liner und Beton führten.
- Fehlstellen im Beton, die bei der Errichtung entstanden.
- Risse im Beton, die durch Schwinden sowie Temperaturbelastungen bei unterschiedlichen Wärmedehnungskoeffizienten von Beton und Stahl während des Versuches entstanden.
- Zonen unterschiedlicher Permeabilität im Beton, die hauptsächlich durch die inhomogene Verteilung der Betonporen und der Änderung des Porenwassergehaltes unter Temperatureinfluß verursacht wurden. Diese Homogenitätsstörungen begünstigen im Falle eines Lecks ein undefiniertes, großflächiges Ausbreiten von Leckagegas entlang der Grenzschicht Liner/Beton und damit ein vom Betonzustand abhängiges gegebenenfalls leckentferntes Eindringen des Leckagegases in den Betonkörper von örtlich unterschiedlicher Intensität.

Die Versuche zeigten, daß die Leckortung mit dem direkt am Liner befindlichen Kanalsystem unabhängig von den Temperatur- und Druckbelastungen immer gelang. Die großflächige Ausbreitung des Leckagegases wird durch die Kanäle am Liner unterbunden; das Gas wird von den lecknächsten Kanälen abgeführt. Bei den im Abstand vom Liner im Beton angeordneten Kanälen ergaben sich mit steigender Temperaturbelastung mehr und mehr Fehlortungen, wobei die schlechtesten Ergebnisse mit den am weitesten vom Liner entfernten Kanälen erzielt wurden.

Dränage

Die beste Wirkung zur Verhinderung bauteilgefährdender Drücke hinter dem Liner bei hypothetisch unterstellten Linerleckagen und im angrenzenden Beton durch Leckagegas oder Wasserdampf ist ebenfalls mit einem direkt am Liner angeordneten Kanalsystem zu erreichen. Das Leckagegas und der gegen den Temperaturgradienten zum Liner hin strömende Wasserdampf werden über die Kanäle abgeleitet, so daß bei entsprechender Dimensionierung ein Druckaufbau begrenzt werden kann. Deutlich erkennbar ist die gute Dränagewirkung der am Liner angeordneten Kanäle aus Messungen, die stattfanden, nachdem diese Kanäle vergossen worden waren. Nach dem Verguß stellten sich erheblich höhere Drücke im Beton und am Liner ein.

Neben der Eignung der Kanäle als Leckortungs- und Dränagesystem können solche Kanäle auch zur Trocknung des Betons im Linerbereich beitragen. Ein Großteil des in den Poren des Betons gebundenen Wassers kann in die als Feuchtesenke dienenden Kanäle wandern und aus dem linernahen Bereich abgezogen werden.

LITERATURANGABEN

- /1 / Sicherheitsberichte für die Kernkraftwerke THTR-300 und HTR-1160.
- /2 / Rheinisch-Westfälischer TÜV,
Sicherheitsgutachten über das 1160 MWe Demonstrations-Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor, Februar 1977.
- /3 / Escherich, K.H.; Kasper, K.; Nickel, M.
Zum Status der Arbeiten für Linerleckdetektionssysteme für HTR-Spannbeton.
Interner Bericht, KFA-ISF-IB-1/78, Juni 1978.
- /4 / Nickel, M.; Altes, J.; Breitbach, G.; Escherich, K.H.; Wolters, J.
Bewertung von vorgeschlagenen Systemen zur Detektion und Ortung von Linerlecks bei Spannbetonbehältern.
Interner Bericht, KFA-ISF, Januar 1979.
- /5 / Menon, S.
Verification Programme of Tests and Studies on Scandinavian BWR-PCRV, Trans. 4th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, San Francisco, 1977.
- /6 / Breitbach, G.; Altes, J.; Escherich, K.H.; Nickel, M.; Wolters, J.
Investigations of the Function of a Liner Leak Localisation and Venting System for High Temperatur Reactors.
- /7 / Nickel, M.; Escherich, K.H.
Verfahren zur Linerleckortung und dafür geeignetes Liner-Leckortungssystem.
Offenlegungsschrift 2856013, Deutsches Patentamt 1980.
- /8 / Breitbach, G.
Ein Beitrag zur Abschätzung von Heliumausströmratens bei Lecks im Liner eines Spannbetonbehälters.
Jül-Spez-117, Juni 1981.
- /9 / Breitbach, G.; Nickel, M.
Ergebnisse der ersten Versuche zum Leckortungs- und Dränagekanalsystem.
Arbeitsbericht, Januar 1980.
- /10/ Breitbach, G.; Nickel, M.; Escherich, K.H.; Altes, J.
Erprobung eines Leckortungssystems für den Liner eines Spannbetonbehälters.
Tagungsbericht, Jahrestagung Kerntechnik, Berlin 1980.
- /11/ Hahn, Modreker
Entwicklung eines Reparaturkonzeptes für den Liner eines Hochtemperaturreaktors mit Spannbetonbehälter (1976).
Konzeptentwicklung der Kraftanlagen Heidelberg AG im Auftrag der GHT Kom.-Nr. 100171.

VERZEICHNIS DER TABELLEN UND ABBILDUNGEN

- Tab. 1 Hauptabmessungen des Versuchsmodells
- Tab. 2 Angaben zum Beton des Versuchsmodells
- Tab. 3 Einspeiseraten in die Linerleckbohrungen für verschiedene Zustände des Versuchsmodells
- Abb. 1 Leckagegaskanäle direkt am Liner angeordnet
- Abb. 2 Leckagegaskanäle in Linernähe im Beton angeordnet
- Abb. 3 Versuchsaufbau zur Detektion und Ortung von Linerlecks
- Abb. 4 Versuchsmodell
- Abb. 5 Prinzipielle Darstellung des Versuchsmodells zur Linerleckdetektion
Kanalsystem direkt am Liner
- Abb. 6 Prinzipielle Darstellung des Versuchsmodells zur Linerleckdetektion
Kanalsystem in Linernähe im Beton
- Abb. 7 Versuchsmodell vor dem Betonieren
- Abb. 8 Betonseitige Ansicht des Versuchsmodells
- Abb. 9 Plan zur Lage der schlaffen Bewehrung
- Abb. 10 Anordnung der Druck- und Temperaturmeßstellen im Versuchsmodell
- Abb. 11 Anschluß einer Leckagegasbohrung an die Einspeiseleitung sowie Linerheizmatte mit Halterung
- Abb. 12 Linerheizmatte und ihre Halterung
- Abb. 13 Versuchsmodell nach Aufbringung der Isolierung
- Abb. 14 Prinzipielle Darstellung des Heliumdetektors
- Abb. 15 Leckagegaseinspeiseraten in die Leckbohrungen vor der Aufheizung
- Abb. 16 Leckageeinspeiseraten in die Leckbohrungen nach der Temperaturzyklisierung (Raumtemperatur 70 °C)
- Abb. 17 Leckagegaseinspeiseraten in die Leckbohrungen nach der Aufheizung auf 120 °C
- Abb. 18 Leckortungsdiagramm für das System am Liner (Linertemperatur ca. 20 °C, durchlässiges Leck)
- Abb. 19 Leckortungsdiagramm für das System am Liner (Linertemperatur ca. 20 °C, undurchlässiges Leck)
- Abb. 20 Leckortungsdiagramm für das linernahe im Beton angeordnete System (Linertemperatur ca. 20 °C, undurchlässiges Leck)
- Abb. 21 Liner- und Betontemperaturen
- Abb. 22 Leckortungsdiagramm für das linernahe im Beton angeordnete System (Linertemperatur 70 °C)

- Abb. 23 Druckverteilung im Beton und am Liner bei Heliumeinspeisung (Linertemperatur 70 °C)
- Abb. 24 Aus dem Beton freigesetzte Wassermenge als Funktion der Absaugzeit (Linertemperatur 120 °C)
- Abb. 25 Druckverteilung im Beton und am Liner bei Heliumeinspeisung (Linertemperatur 120 °C)
- Abb. 26 Leckeinspeiserate in Abhängigkeit vom Lineranpreßdruck (Leck-Nr. 21)
- Abb. 27 Leckeinspeiserate in Abhängigkeit vom Lineranpreßdruck (Leck-Nr. 16 und 8)
- Abb. 28 Leckeinspeiserate in Abhängigkeit vom Einspeisedruck (Leck-Nr. 15)
- Abb. 29 Gasausströmen aus den lecknahen Kanälen
- Abb. 30 Lineranpreßvorrichtung
- Abb. 31 Druckabfall imn Beton bei steigendem Lineranpreßdruck (Leck-Nr. 16)
- Abb. 32 Druckverteilung im Beton und am Liner bei Heliumeinspeisung (nach Verguß des Linerkanalsystems)
- Abb. 33 Anordnung der Trennschnitte zum Zersägen des Modells und Positionsangaben zu den Abb. 34 bis 39
- Abb. 34 Typische Poren- und Lunkerverteilung im Beton
- Abb. 35 Rißzone im linernahen Bereich
- Abb. 36 Gestörter Liner-Beton-Kontakt
- Abb. 37 Relativ intakter Liner-Beton-Kontakt
- Abb. 38 Teilansicht einer Schnittfläche durch das Versuchsmodell
- Abb. 39 Typische Betonfehlstelle unter einem Kühlrohr

Tabelle 1

Hauptabmessungen des Versuchsmodells

Liner

Linerbreite	2,5 m
Linerhöhe	2,0 m
Linerdicke	8 mm
Leckgaseintrittsöffnungen (Liner)	
Bohrungsdurchmesser	3 mm
Bohrungsteilung	
horizontal	300 mm
vertikal	300 mm

Verankerungsbolzen

Bolzenlänge	300 mm
Bolzendurchmesser	18 mm
Bolzenkopf, Dicke (Mutter M16) SW	12,8 mm
	24 mm
Bolzenraster	300 x 300 mm

Betonkanäle (System direkt am Liner)

Kühlrohrtangierende vertikale Kanäle	
Kanaldurchmesser	16 mm
Kanalteilung	300 mm

Horizontale Kühlrohre (Vierkant)

Kühlrohr außen Abmessung	25 x 25 mm
Wandstärke	2 mm
Kühlrohrabstände	100 mm
Leckgaseintrittsöffnungen am Kühlrohr	
Bohrungsdurchmesser	4 mm
Bohrungsteilung	300 mm
(bzw. 150 mm, da von Kühlrohr zu Kühlrohr versetzt angeordnet)	

Betonkanäle (System in Linernähe)

Kanaldurchmesser	20 mm
Kanalteilung	500 mm
Kanalabstände vom Liner:	
vertikale Kanäle	280 mm
horizontale Kanäle	100 mm

Betonteil

Breite	2,5 m
Höhe	2,0 m
Dicke	0,5 m
Bewehrung:	
Stabdurchmesser	12 mm
Maschenweite	190 mm
(genaue Abmessungen s. Abb. 9)	

Druckmeß-Kapillarrohre

Rohraußendurchmesser	4 mm
Wandstärke	1 mm
Rohrlängen	1,5 m
Anordnung: s. Abb. 7 und 10	

Thermoelemente

Mantelmaterial	1,4541
Manteldurchmesser	1,0 mm
Thermopaar	NiCr-Ni
(Anordnung: s. Abb. 9 und 10)	

Tabelle 2

Angaben zum Beton des Versuchsmodells

Zusammensetzung und Kennwerte des Betons:

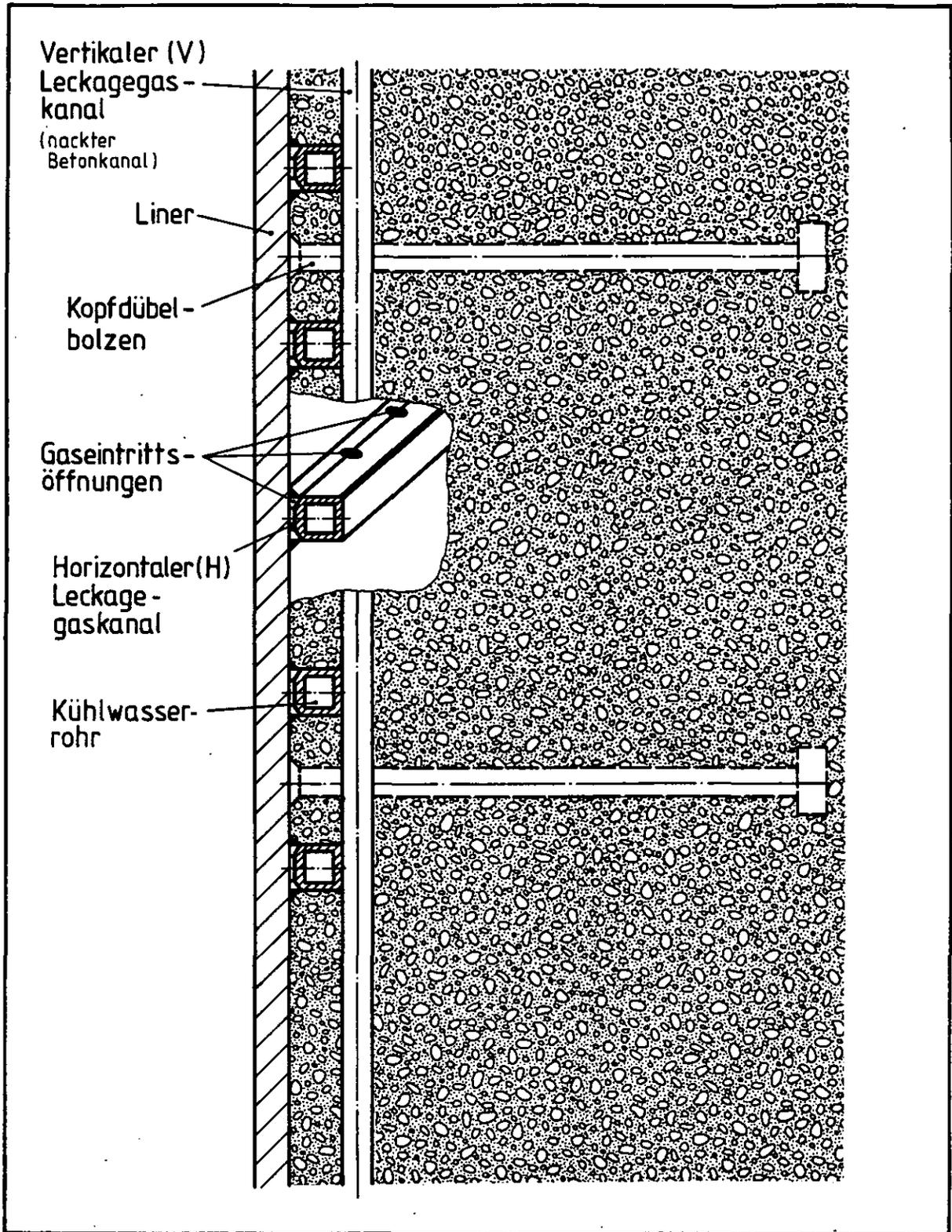
Druckfestigkeit:	$P_{C90S} = 510 \text{ kp/cm}^2$	
Zement:	370 kg/m^3 HOZ 450 L	
Zuschlag:	gebrochener Kalkstein in Korngruppen 0/0,25; 0/2; 2/5; 5/8; 8/12; 12/18; 18/25	
	Kornzusammensetzung:	
	Lochweite	Siebdurchgang
	Siebe nach DIN 4188	Gew.-%
	0,25	5
	0,5	9
	1	15
	2	23
	5	42
	8	54
	12	69
	18	84
	25	100
Zusatzmittel:	'Sikotan-Verflüssiger 72, flüssig (BV)' $16 \text{ cm}^3/\text{kg}$ Zement	
Wasserzementwert:	0,47	
Ausbreitmaß:	oberer Grenzwert 53 cm	
Frischbetondichte:	$2,3 \text{ t/m}^3$	

Die Verdichtung erfolgt durch zwei Außenrüttler.

TABELLE 3

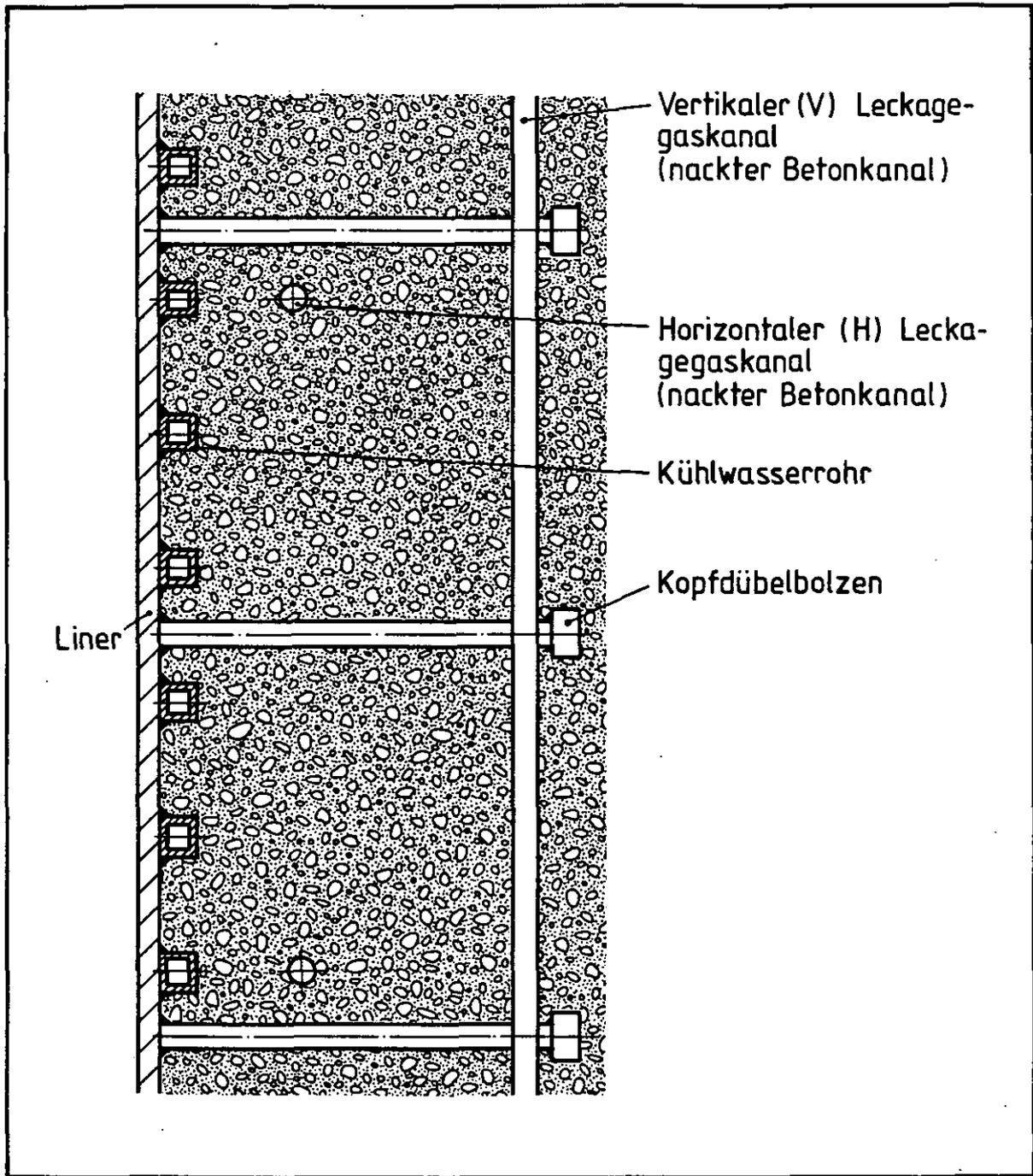
Linerleckbohrung Nr.	Liner-temperatur ca. 20°C vor erstem Aufheizen	Liner-temperatur 70°C erstmalige Aufheizung auf 70 °C	Liner-temperatur ca. 20°C nach erst. Aufheizung	Liner-temperatur 70°C nach dreimaligem Temperat.-Zyklieren (20/70°C)	Liner-temperatur ca. 20°C nach dreimaligem Temperat.-Zyklieren (20/70°C)	Liner-temperatur 120°C erstmalige Aufheizung auf 120°C	Liner-temperatur ca. 20°C nach erst. Aufheizung auf 120°C	Liner-temperatur 120°C nach dreimaligem Temperat.-Zyklieren (20/120°C)	Liner-temperatur ca. 20°C nach dreimaligem Temperat.-Zyklieren (20/120°C)	Liner-temperatur ca. 20°C nach Verpressen des vorderen Systems
1	1,91	8,06	12,06	19,05	15,72	92,99	65,92	114,38	88,66	73,94
2	6,15	13,00	10,61	20,61	14,06	121,89	86,85	186,46	131,63	100,92
3	16,41	20,72	23,28	36,67	26,94	161,09	181,26	249,89	238,16	157,03
4	4,43	6,94	13,94	21,00	19,93	77,86	96,65	134,68	176,51	121,62
5	1,07	6,06	11,94	22,94	19,11	83,66	105,81	146,36	152,53	85,24
6	2,07	6,61	9,09	10,61	10,94	59,33	60,52	87,57	85,33	62,08
7	0,02	0,67	0,83	1,44	1,37	13,75	10,07	18,81	10,86	14,28
8	0,16	0,41	0,34	1,01	0,40	10,64	4,65	16,13	4,51	11,42
9	0,05	0,16	0,30	2,26	1,94	35,91	21,22	32,45	13,32	16,34
10	0,33	1,02	1,44	2,00	2,06	20,29	15,38	26,05	14,78	12,96
11	0,14	0,22	0,49	1,43	1,39	15,20	13,68	24,38	14,29	12,78
12	0,08	0,53	0,71	1,59	1,89	12,36	9,55	17,58	9,64	6,18
13	0,38	3,07	3,61	5,31	8,00	80,18	43,77	67,81	61,03	9,52
14	} kleiner 10 ⁻²	1,08	1,72	7,18	5,22	58,08	20,28	73,53	18,36	5,84
15		1,02	1,28	6,09	4,78	50,45	12,00	43,28	9,42	5,15
16		0,57	0,81	1,67	1,72	32,33	8,24	30,36	6,73	7,97
17		1,02	1,28	2,46	2,06	39,71	12,66	36,55	10,85	6,84
18		1,29	1,28	1,35	1,78	23,01	11,48	24,57	12,66	8,55
19	0,08	1,86	2,78	4,59	4,61	16,81	31,78	42,26	41,97	73,53
20	0,22	1,22	5,00	7,96	8,94	31,90	60,74	90,77	91,47	94,90
21	0,54	2,83	3,09	6,65	7,67	39,14	47,28	96,40	64,60	93,33
22	1,43	4,62	7,78	9,74	11,17	65,37	66,25	116,27	91,01	86,38
23	8,96	14,74	17,78	26,67	20,00	123,57	111,50	182,84	135,00	83,54
24		2,22	4,50	5,78	6,67	28,20	42,18	83,89	71,49	74,68
25	1,18	1,65	2,36	3,35	4,94	30,35	29,78	37,48	30,24	15,62
26	} kleiner 10 ⁻²	0,16	0,27	1,01	1,39	15,26	10,20	21,09	11,88	6,32
27		0,12	0,14	0,46	0,39	9,78	2,76	9,04	2,38	1,84
28		0,10	0,30	0,66	0,61	10,12	3,12	9,32	2,63	2,12
29		0,11	0,22	0,58	0,42	9,78	5,06	13,50	5,89	5,66
30		0,56	0,66	1,14	1,39	17,66	13,74	26,64	15,71	5,81
Pa·m ³ /s										

Einspeiseraten in die Linerleckbohrungen für verschiedene Zustände des Versuchsmodells.
Einspeisedruck: 2,0 bar_{abs}



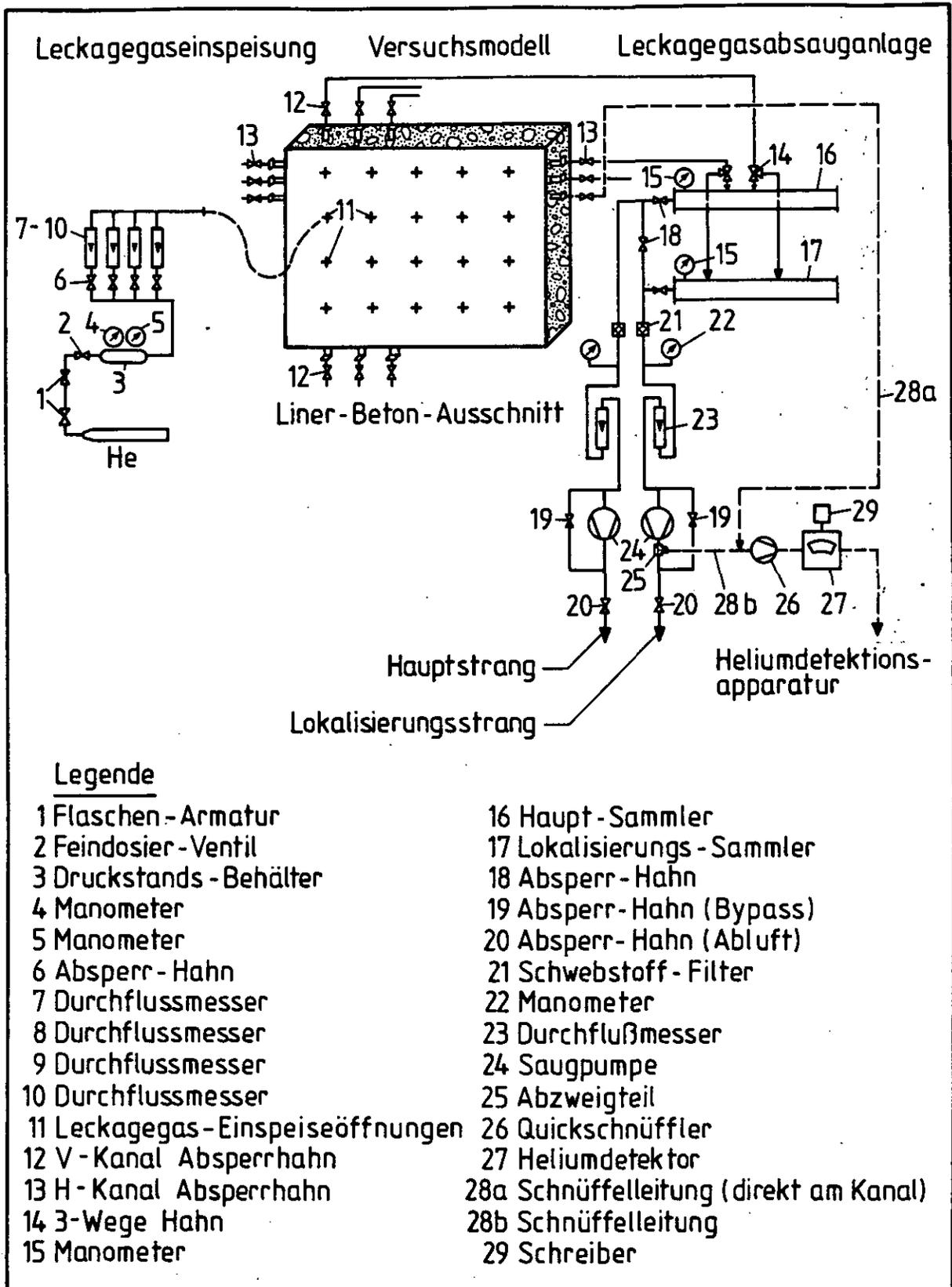
Direkt am Liner angeordnetes Kanalsystem

Abb.:1

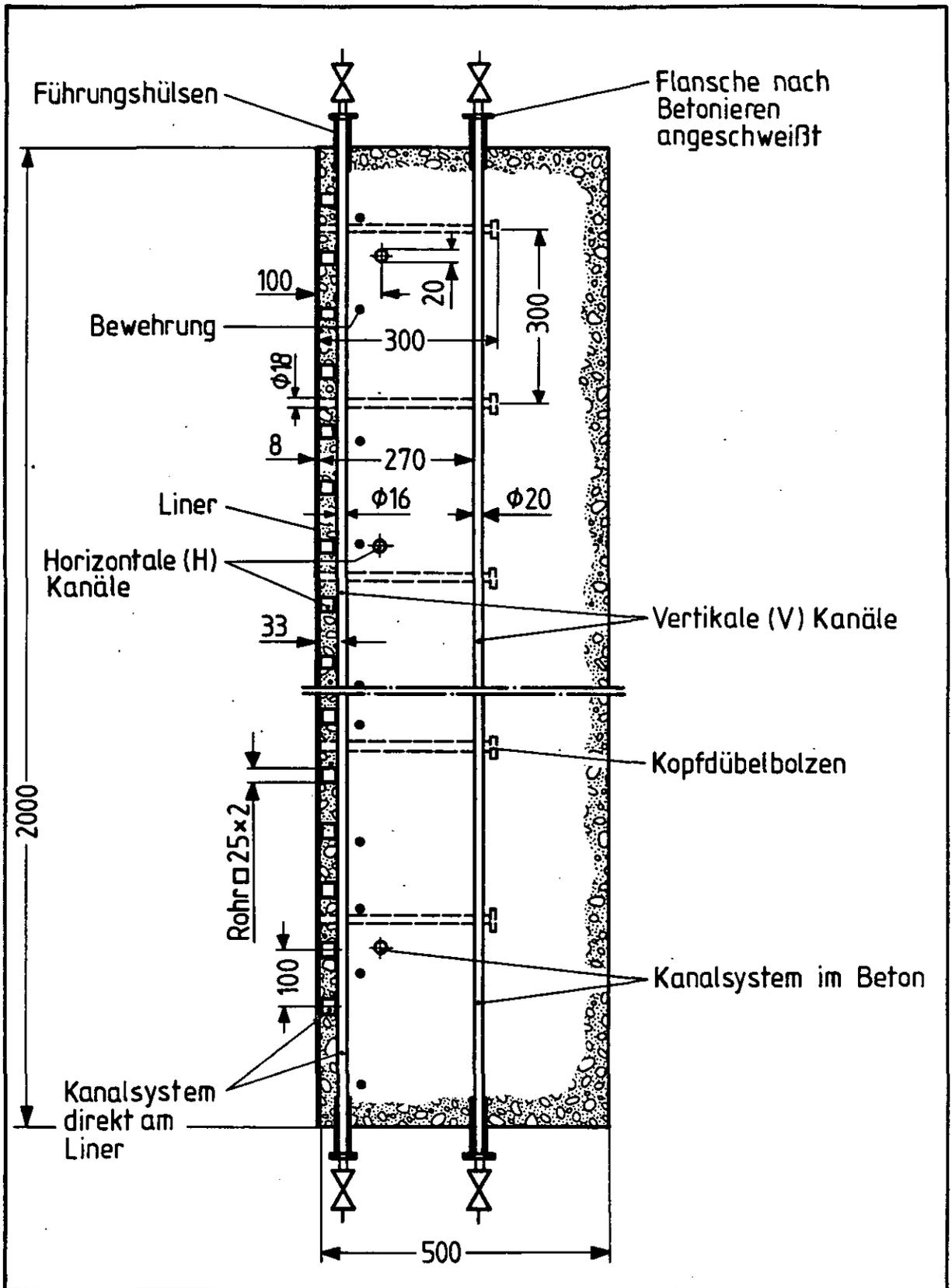


In Linernähe im Beton angeordnetes Kanalsystem

Abb.:2

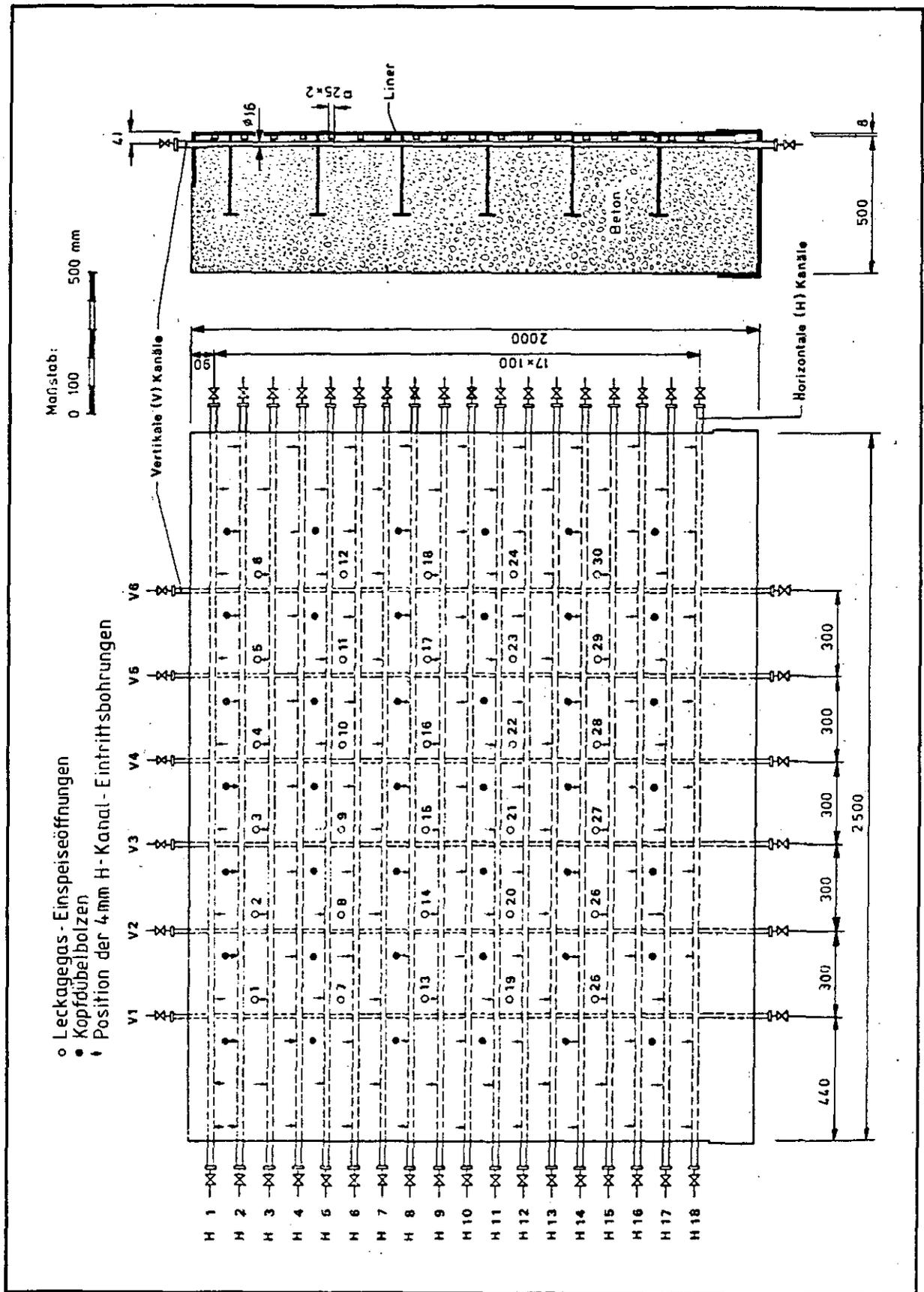


Versuchsaufbau zur Detektion und Ortung von Linerlecks

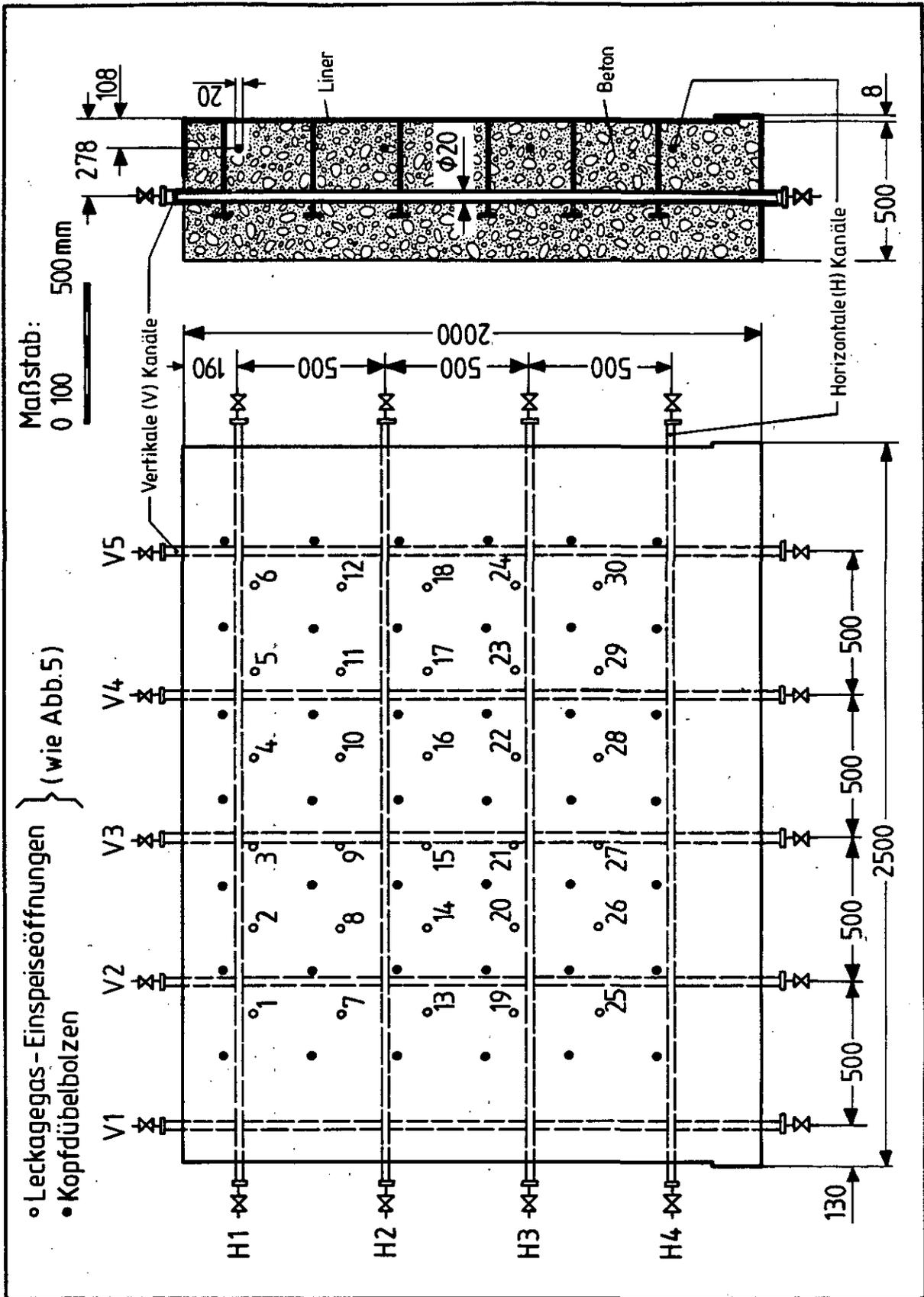


Versuchsmodell

Abb.: 4



Darstellung des direkt am Liner angeordneten Kanalsystems



Darstellung des in Linernähe im Beton angeordneten Kanalsystems

Abb.:6

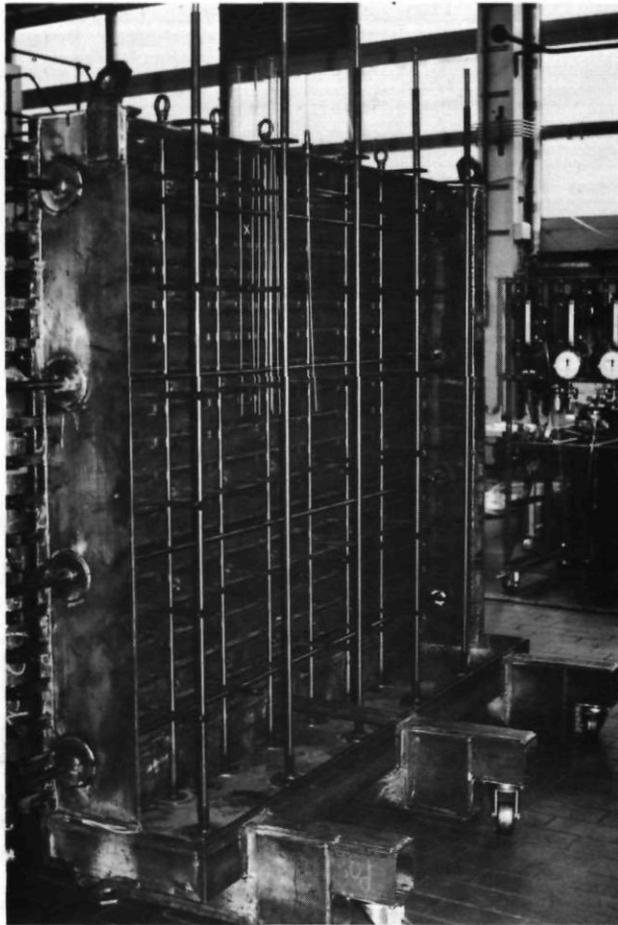


Abb. 7: Versuchsmodell vor dem Betonieren.

Die Stangen dienten zum Ausbilden der Betonkanäle; sie wurden etwa 8 h nach dem Betonieren gezogen. Die dünnen im mittleren Bildteil oben zu erkennenden Röhrchen dienen zur Druckmessung im Beton.

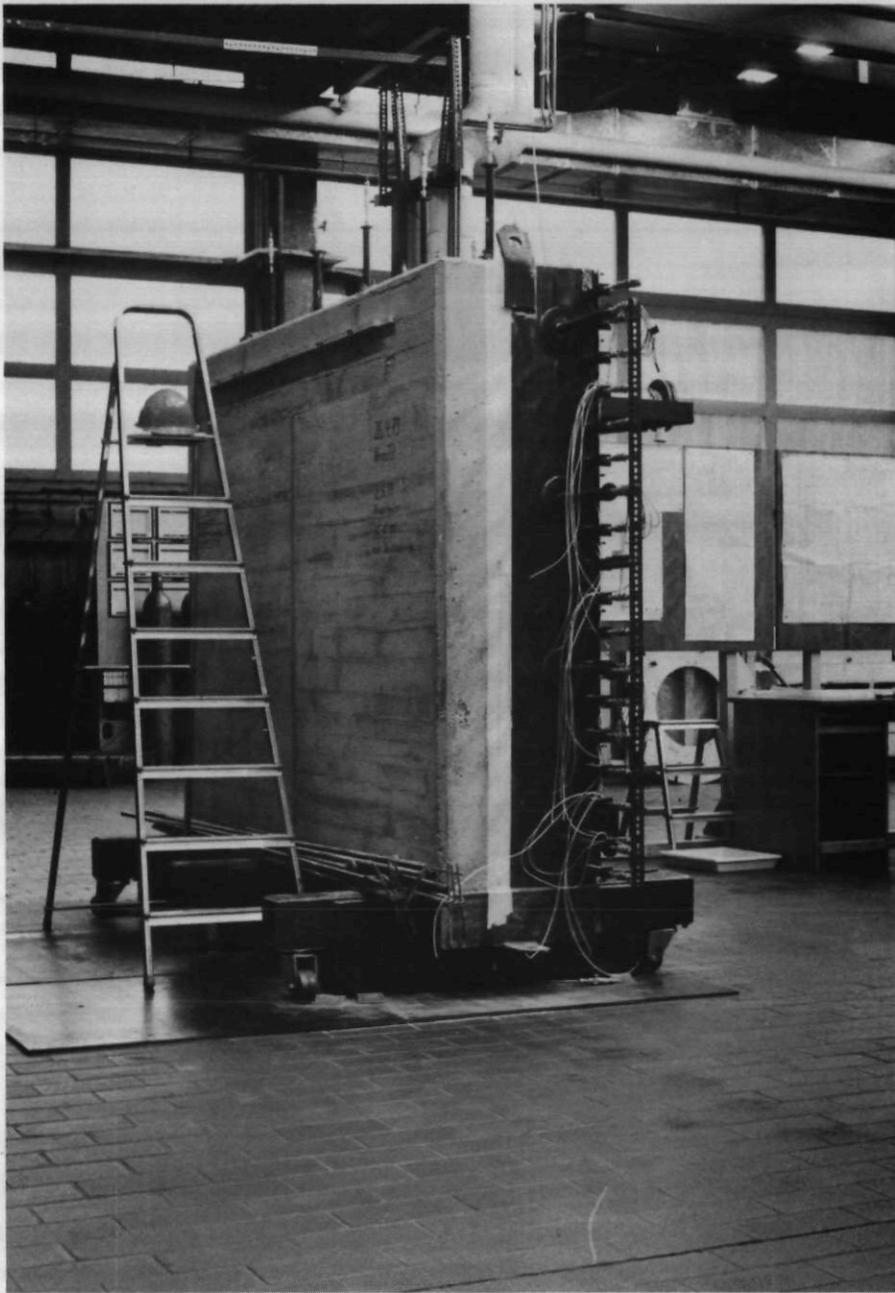
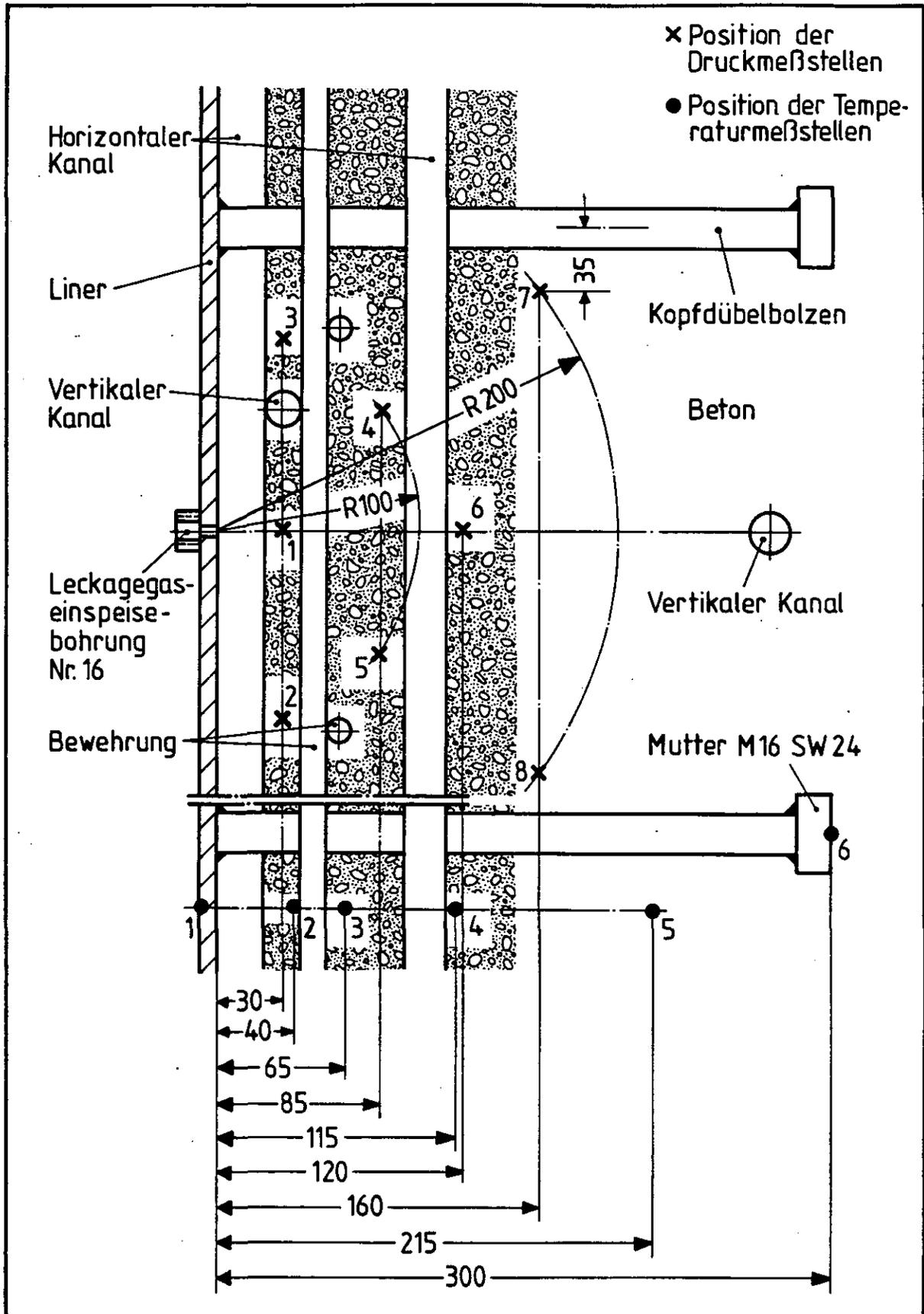


Abb. 8: Betonseitige Ansicht des Versuchsmodells



Anordnung der Druck- und Temperaturmeßstellen im Versuchsmodell



Abb. 11: Anschluß einer Leckageeintrittsbohrung an die Einspeiseleitung
sowie Heizmatte mit Halterung

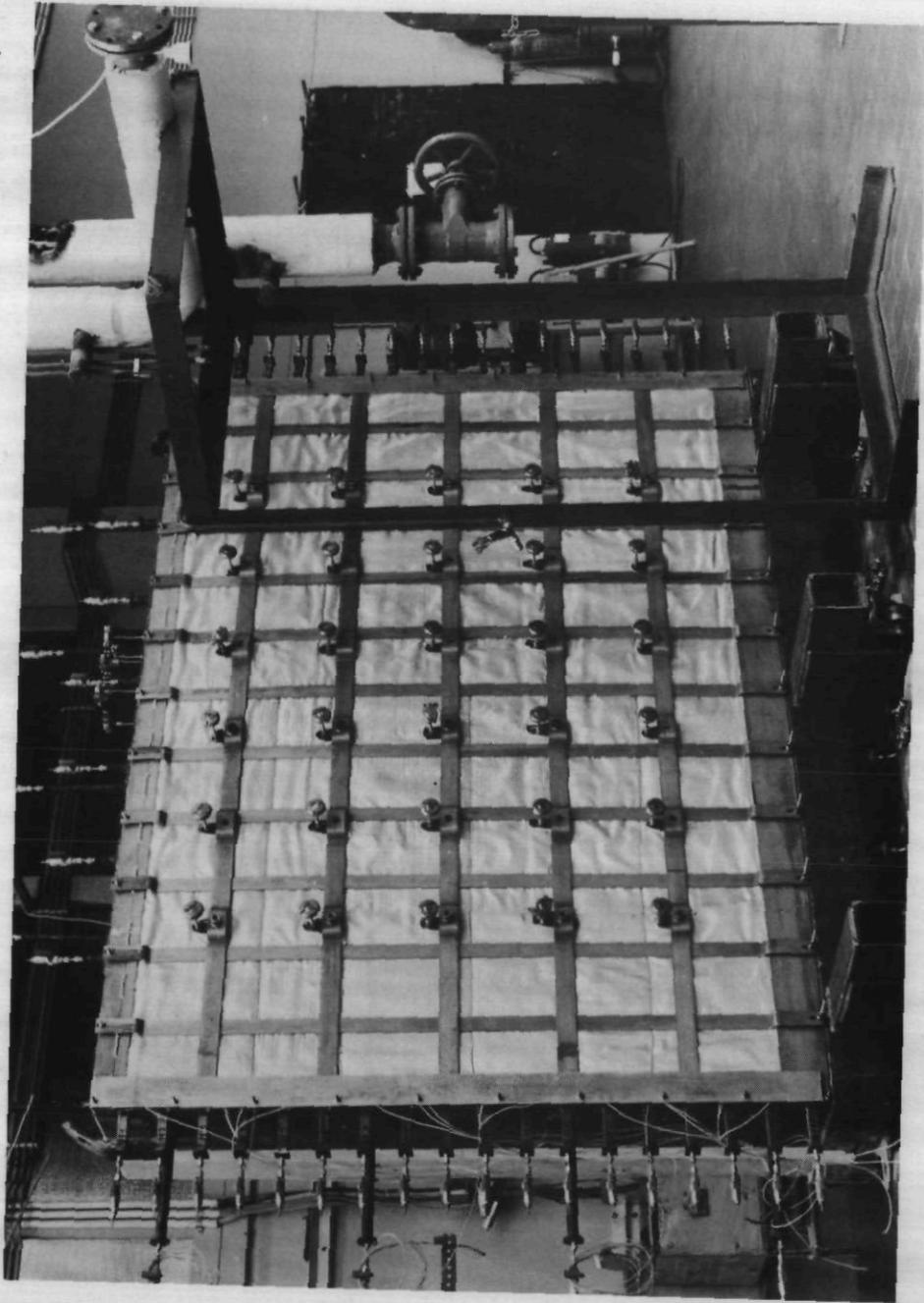


Abb. 12: Linerheizung und ihre Halterung

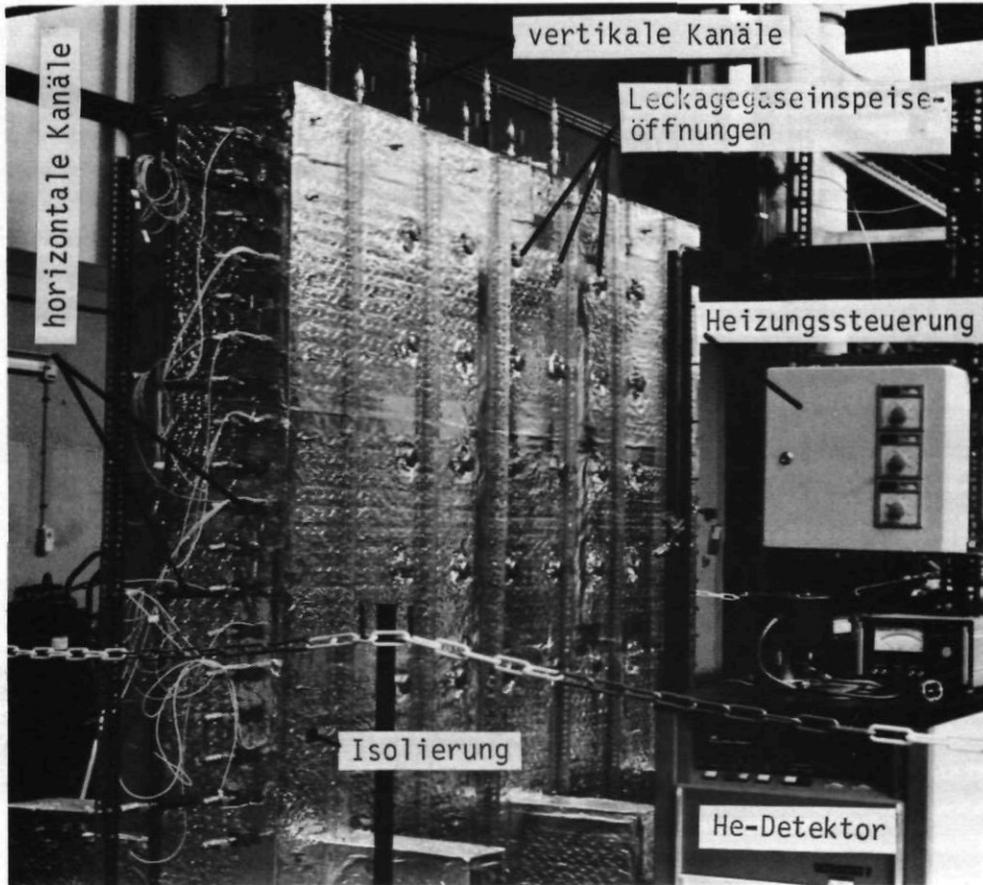
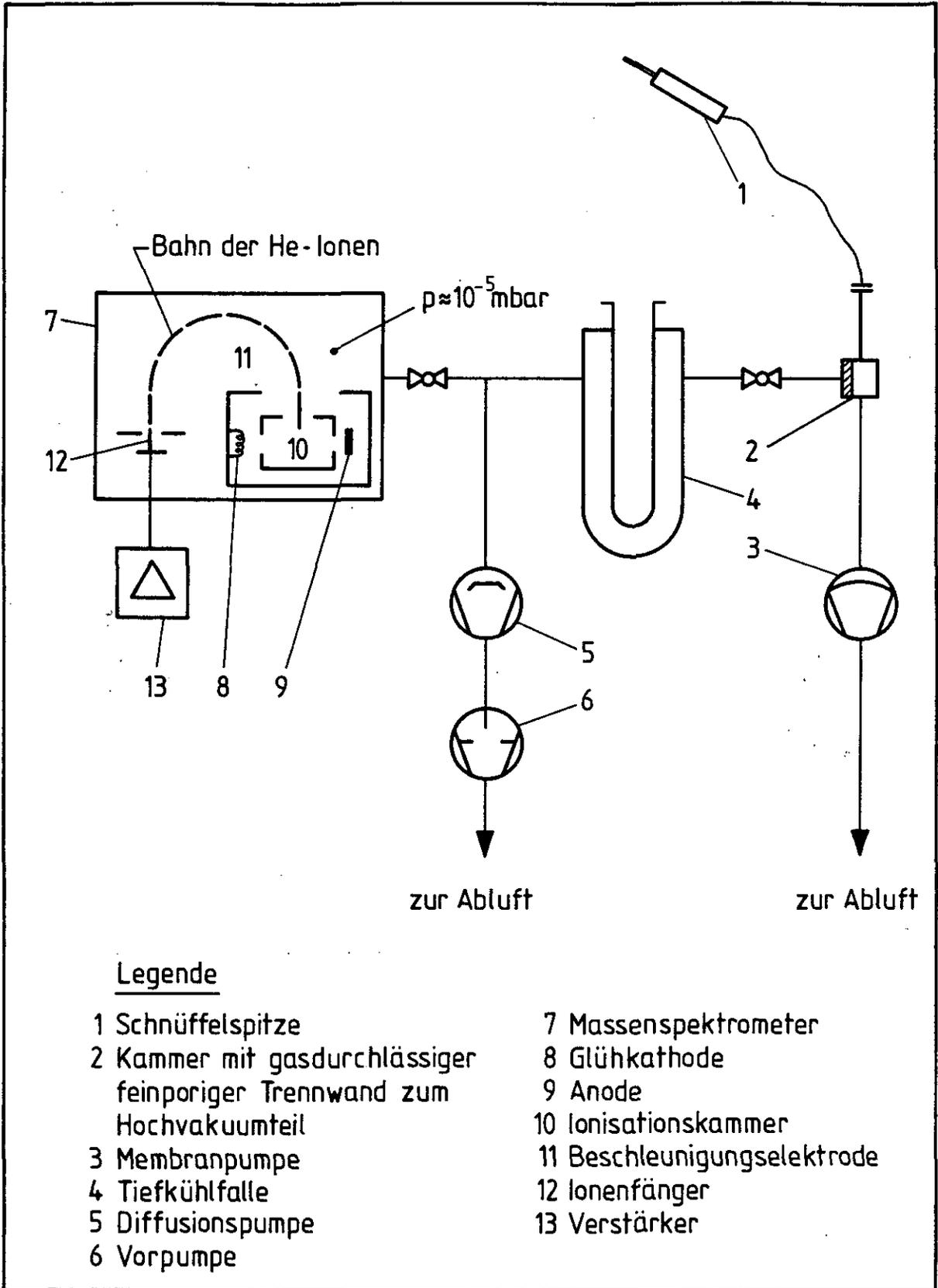
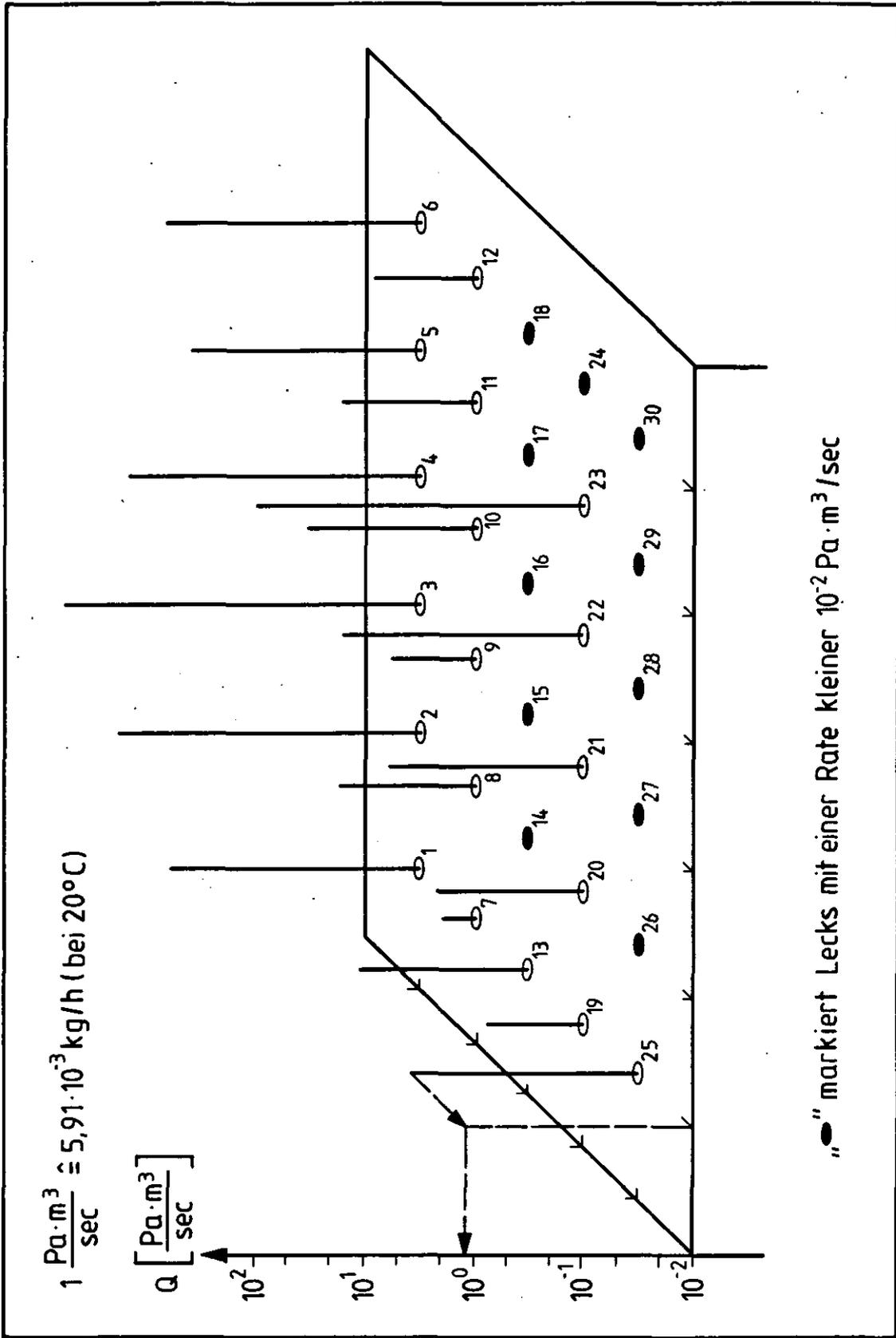


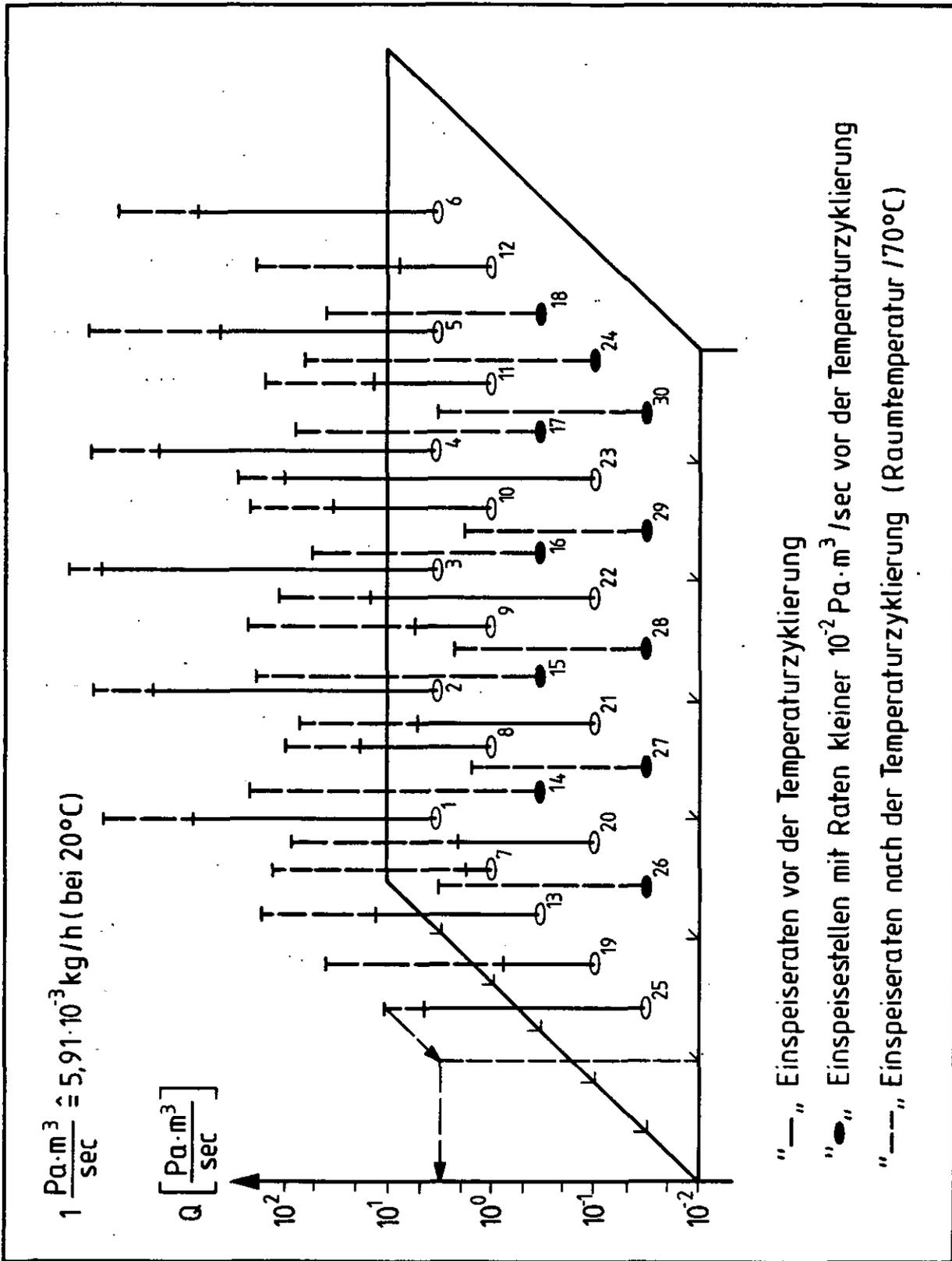
Abb. 13: Versuchsmodell nach Aufbringen der Isolierung



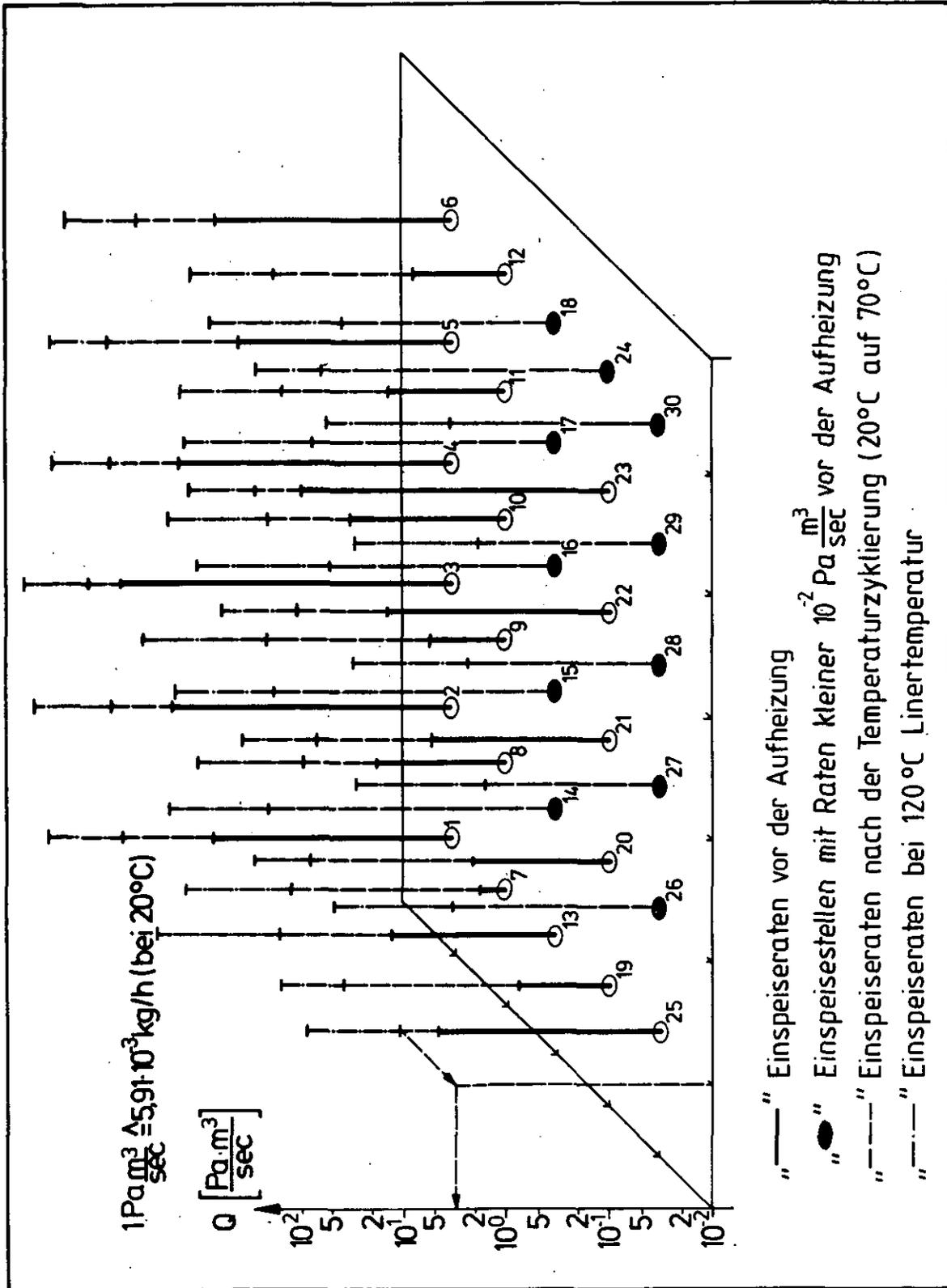
Prinzipielle Darstellung des Heliumdetektors



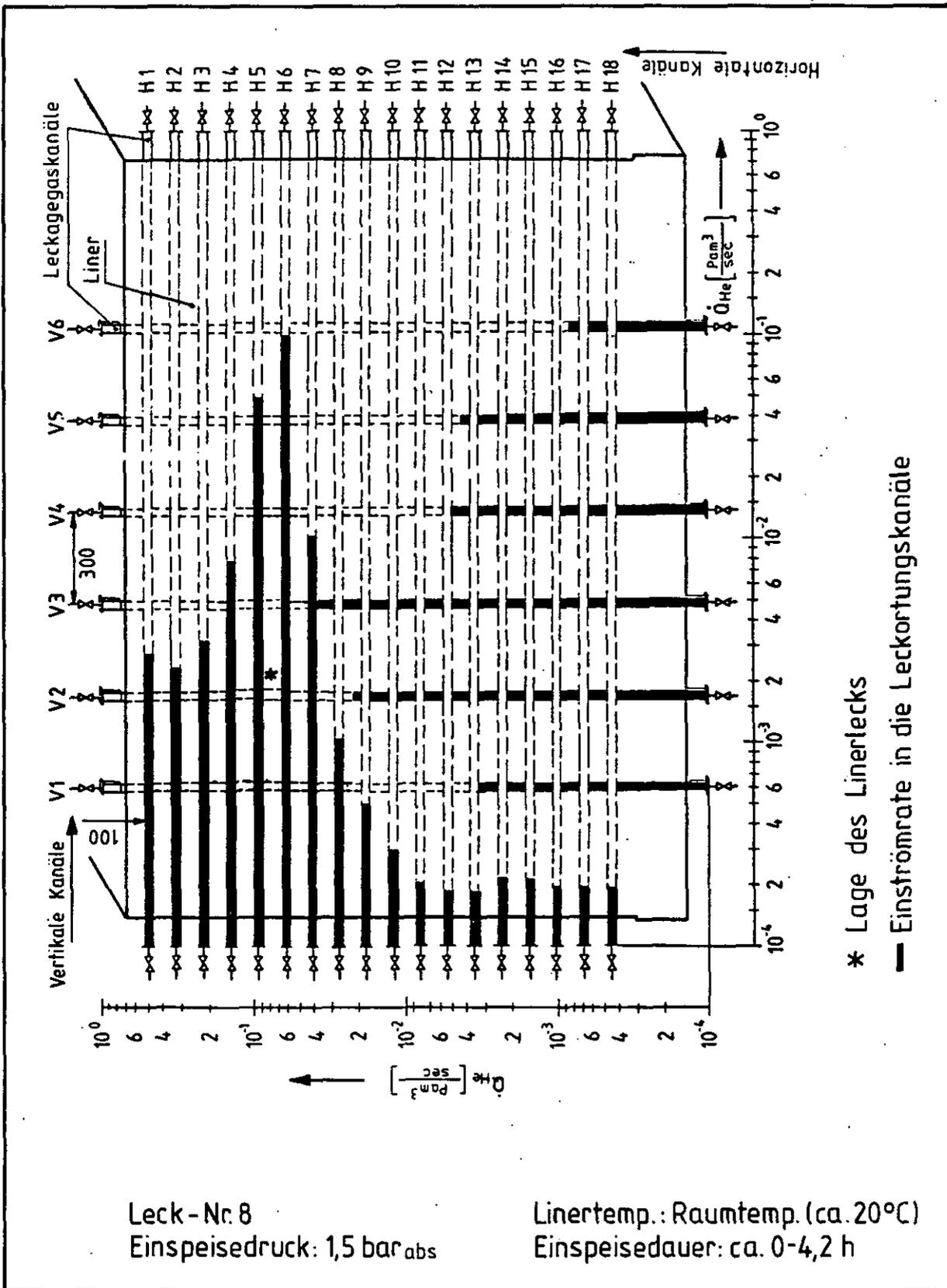
Leckagegaseinspeiseraten in die Leckbohrungen vor der Aufheizung
 (Einspeisedruck: $2 \text{ bar}_{\text{abs}}$)



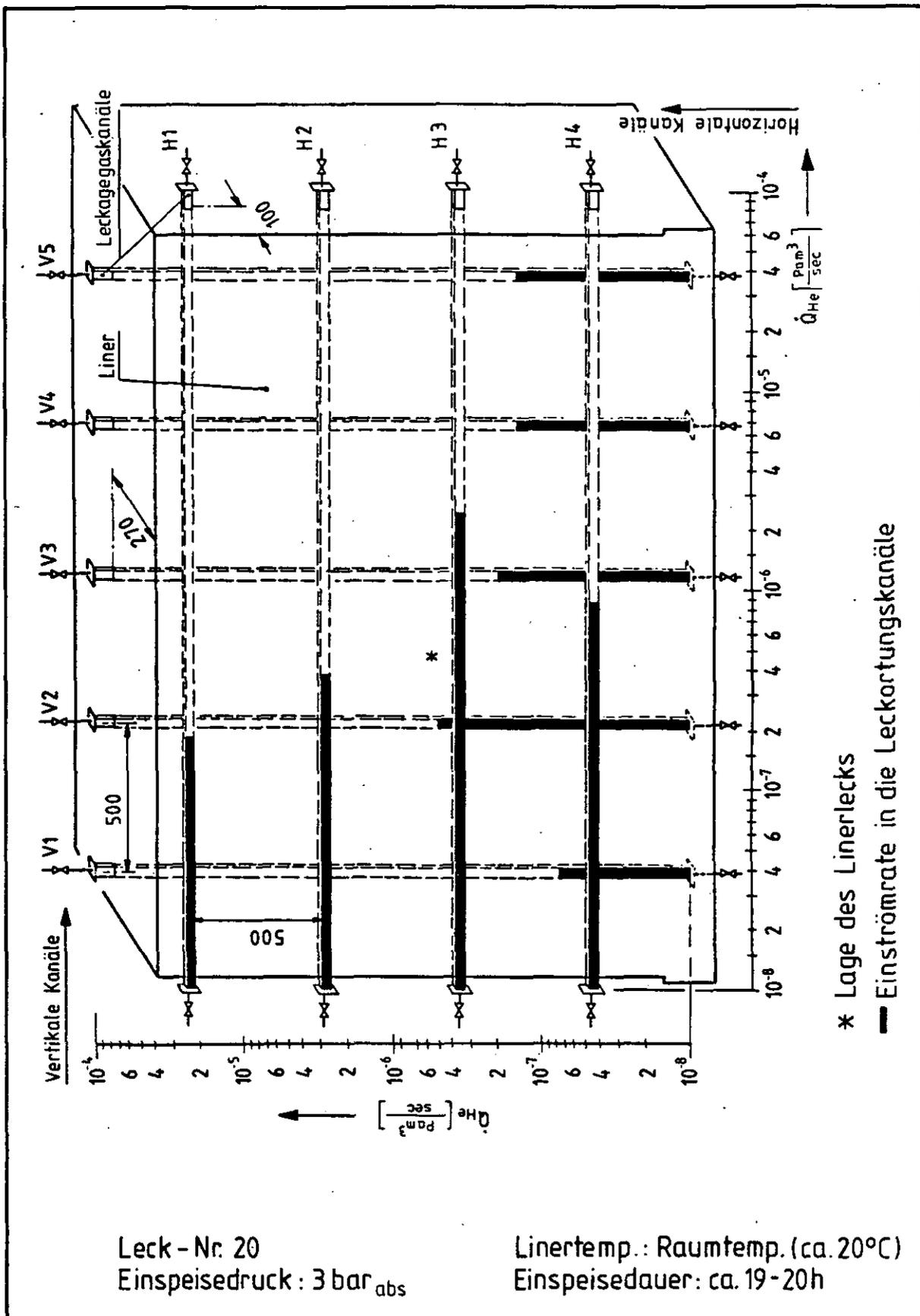
Leckagegaseinspeiseraten in die Leckbohrungen nach der Temperaturzyklisierung (Raumtemperatur / 70°C , Einspeisedruck: $2 \text{ bar}_{\text{abs}}$)



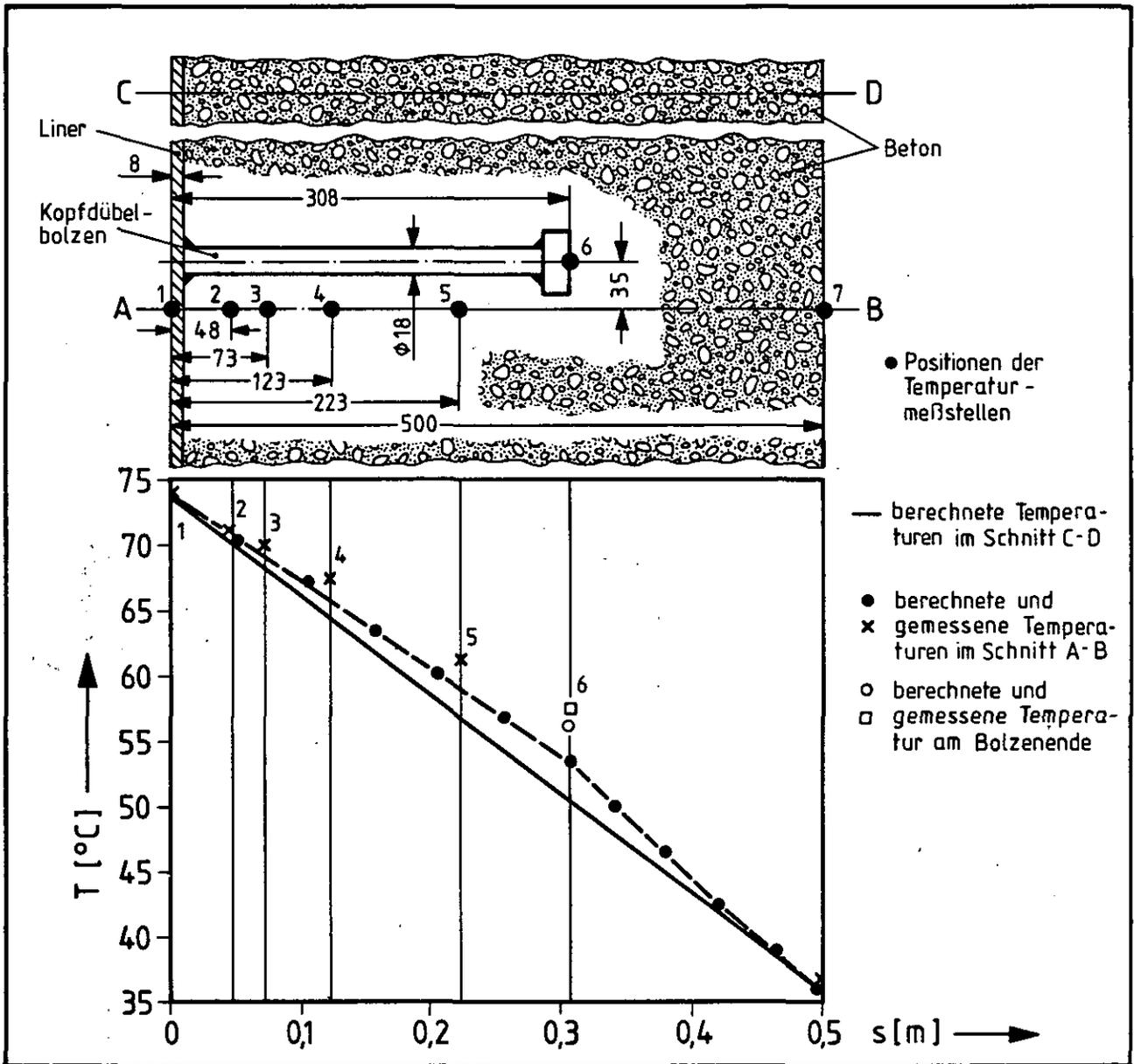
Leckagegaseinspeiseraten in die Leckbohrungen nach der Aufheizung auf 120°C (Einspeisedruck: $2 \text{ bar}_{\text{abs}}$)



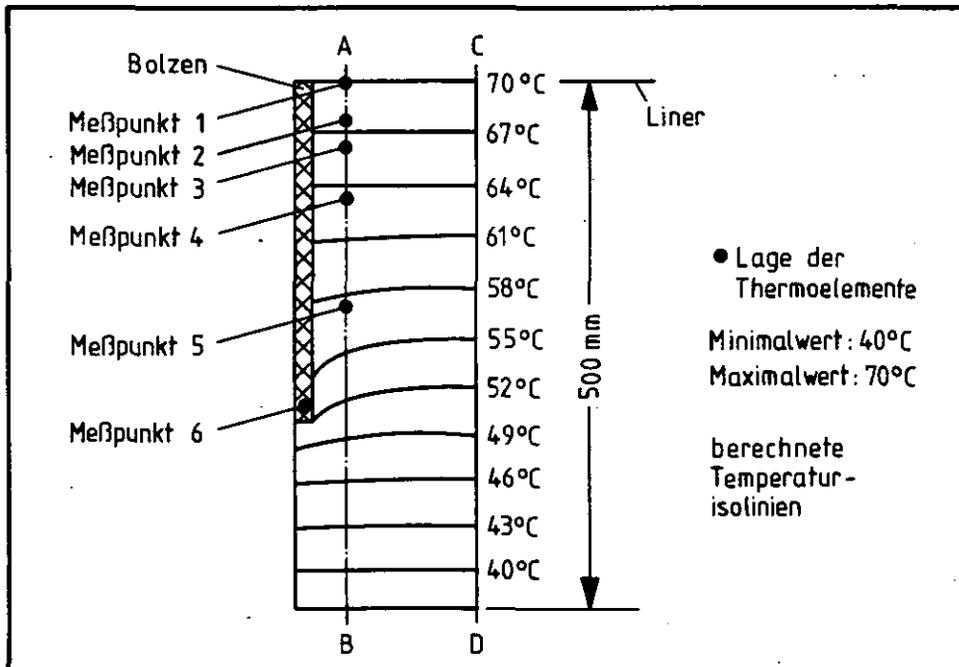
Leckortungsdiagramm für das System am Liner ('durchlässiges Leck')



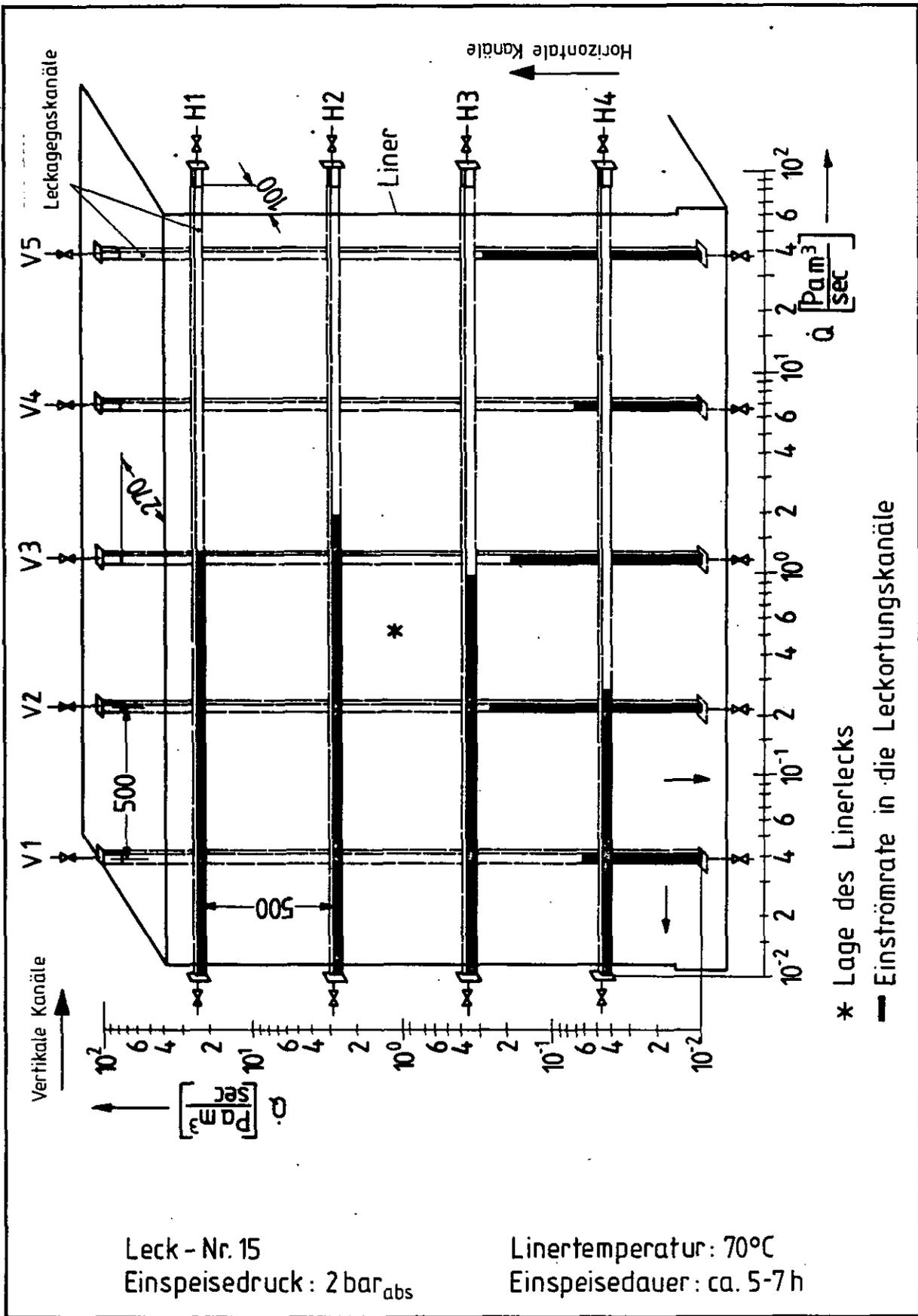
Leckortungsdiagramm für das in Linernähe im Beton angeordnete System ('undurchlässiges Leck')



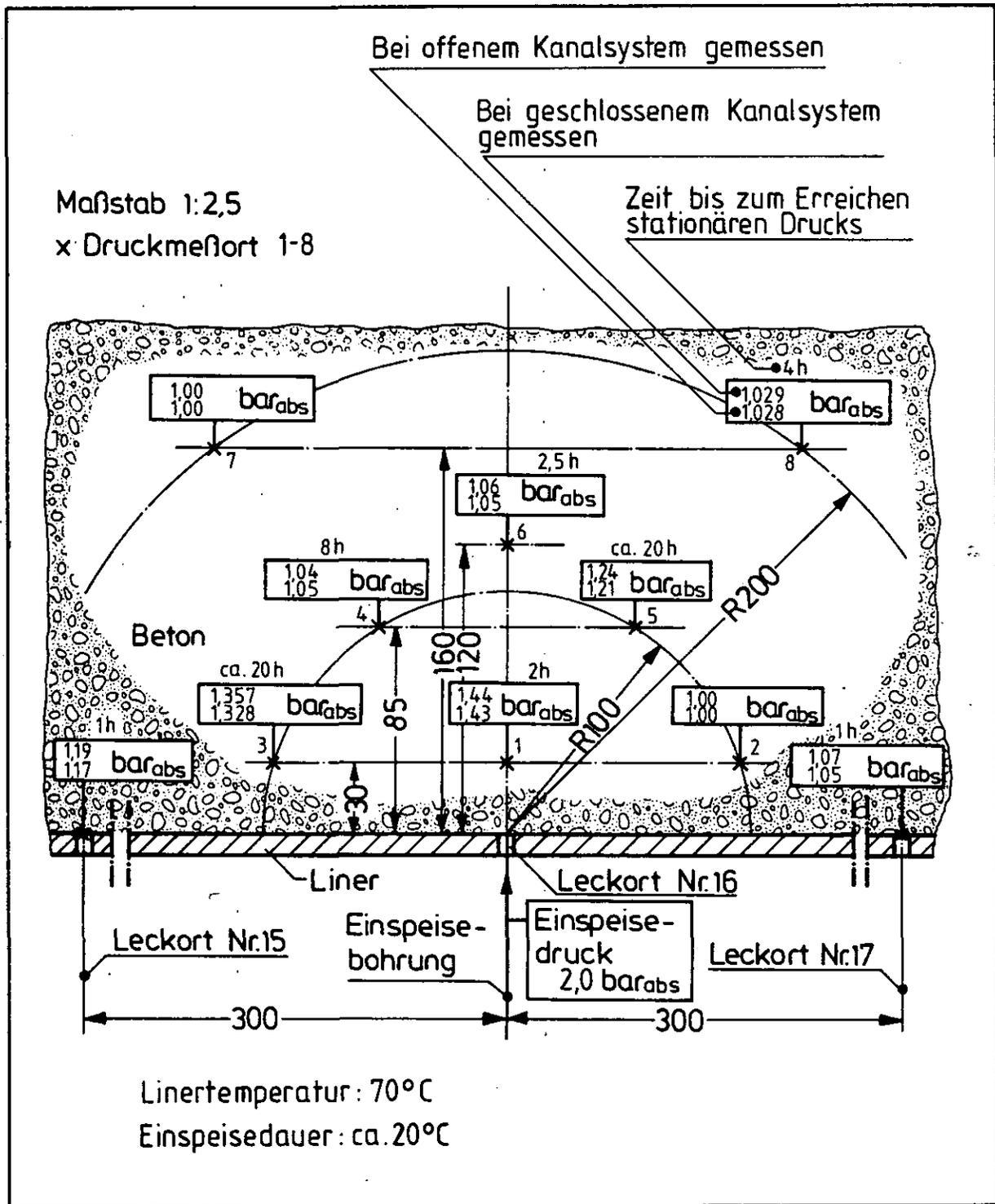
Temperaturen im Liner-Beton-Ausschnitt



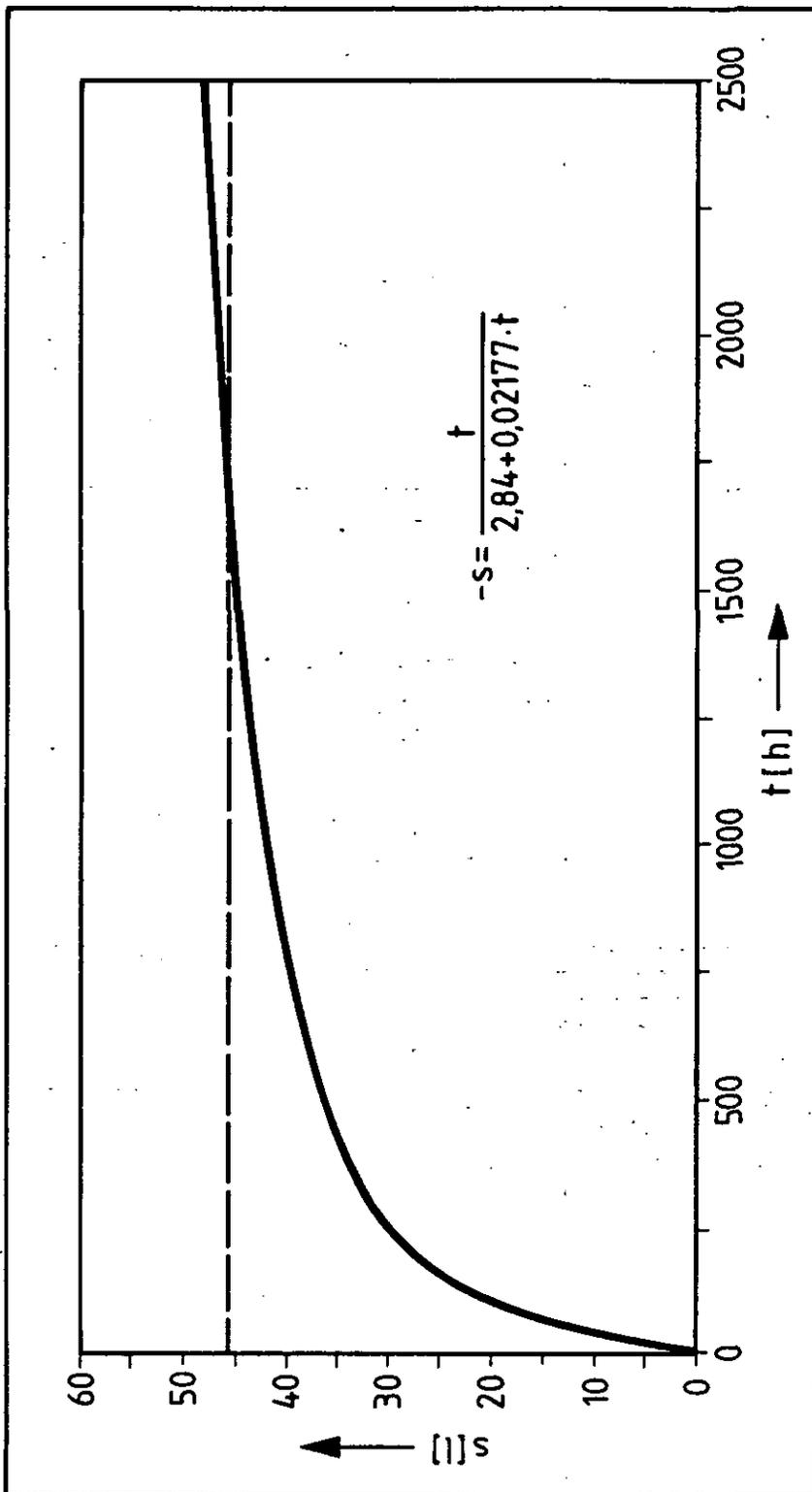
Einfluß des Bolzens auf die Temperaturmeßwerte



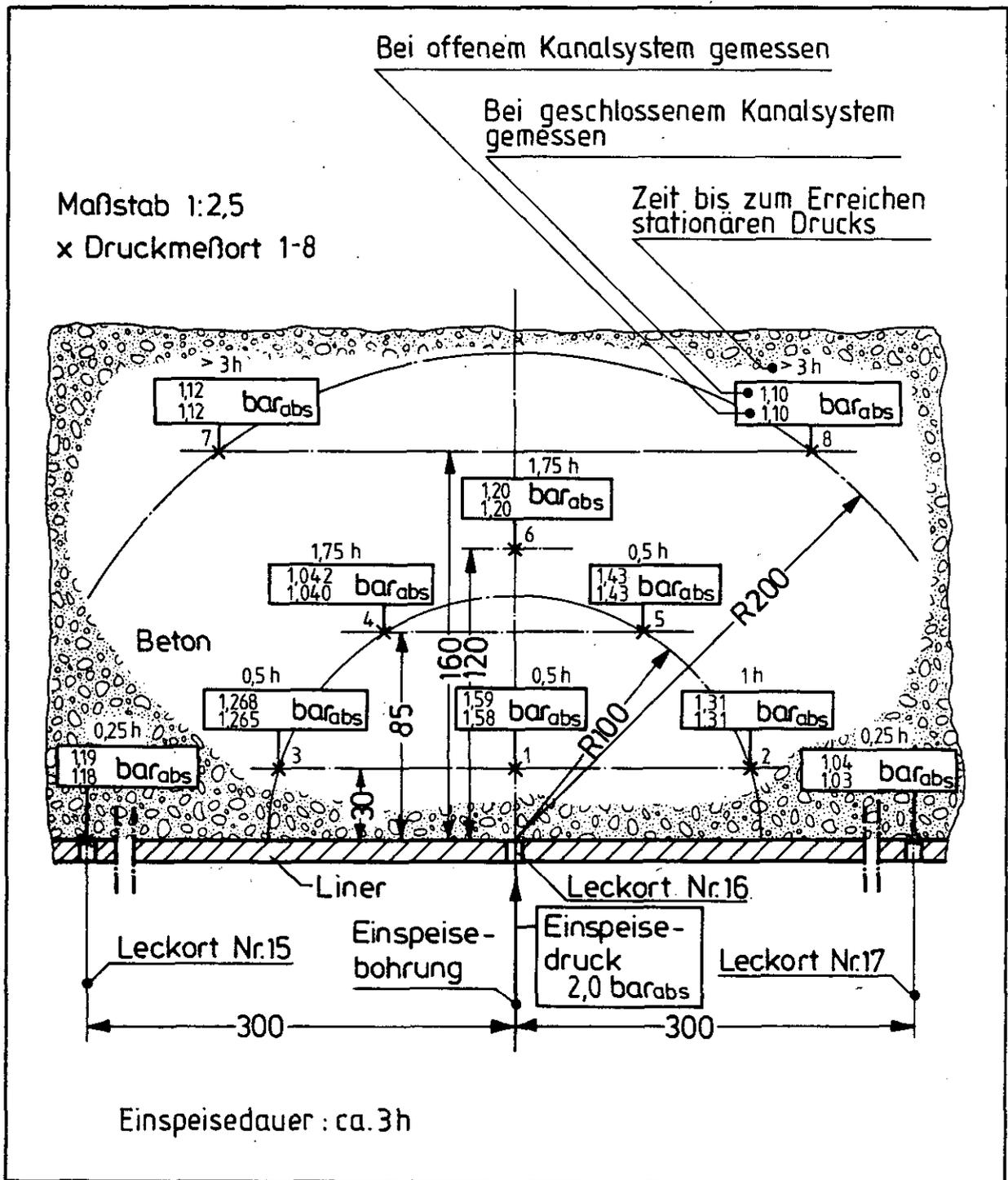
Leckortungsdiagramm für das in Linernähe im Beton angeordnete System



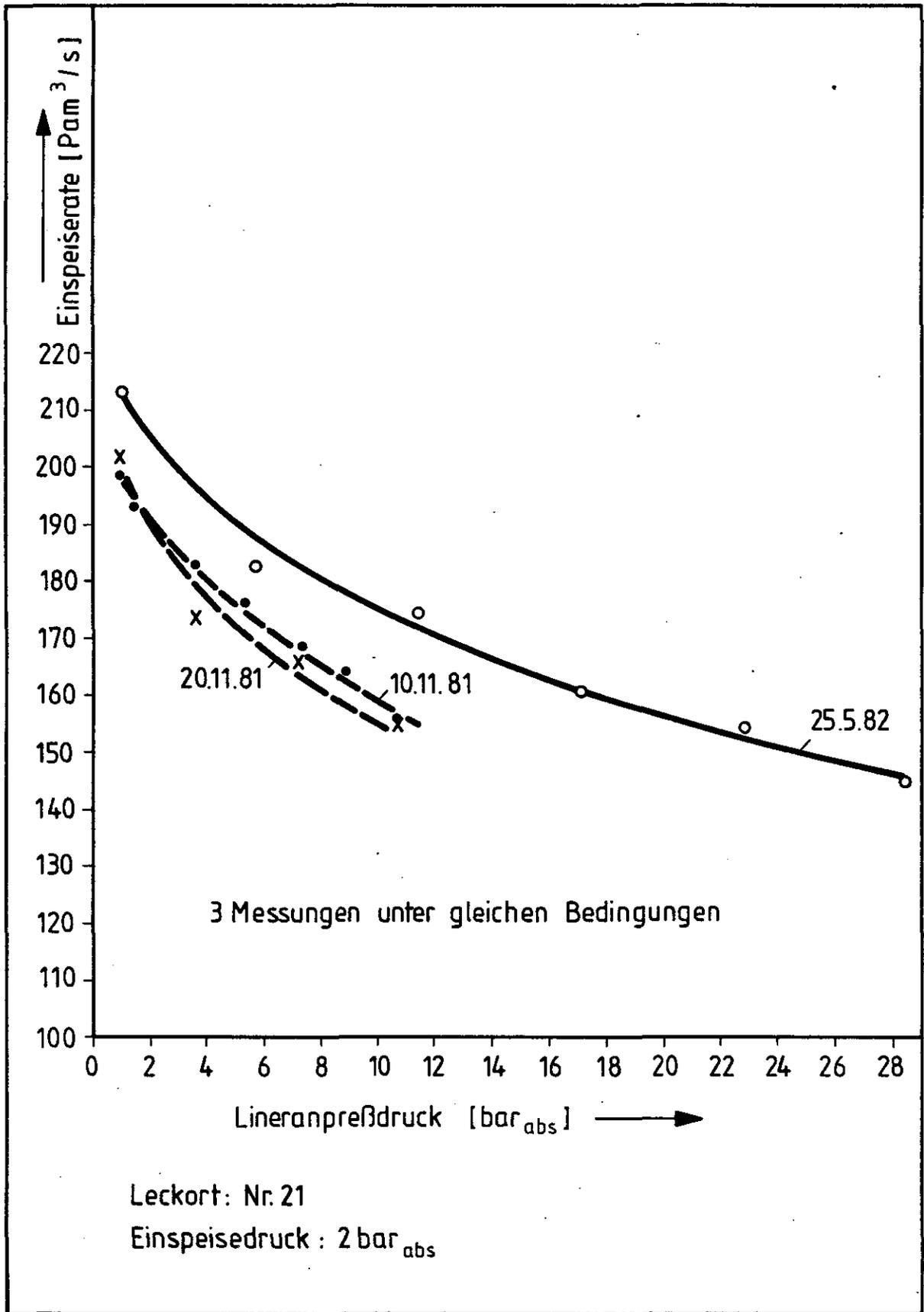
Druckverteilung im Beton und am Liner bei Heliumeinspeisung nach erstmaligem Aufheizen des Liners



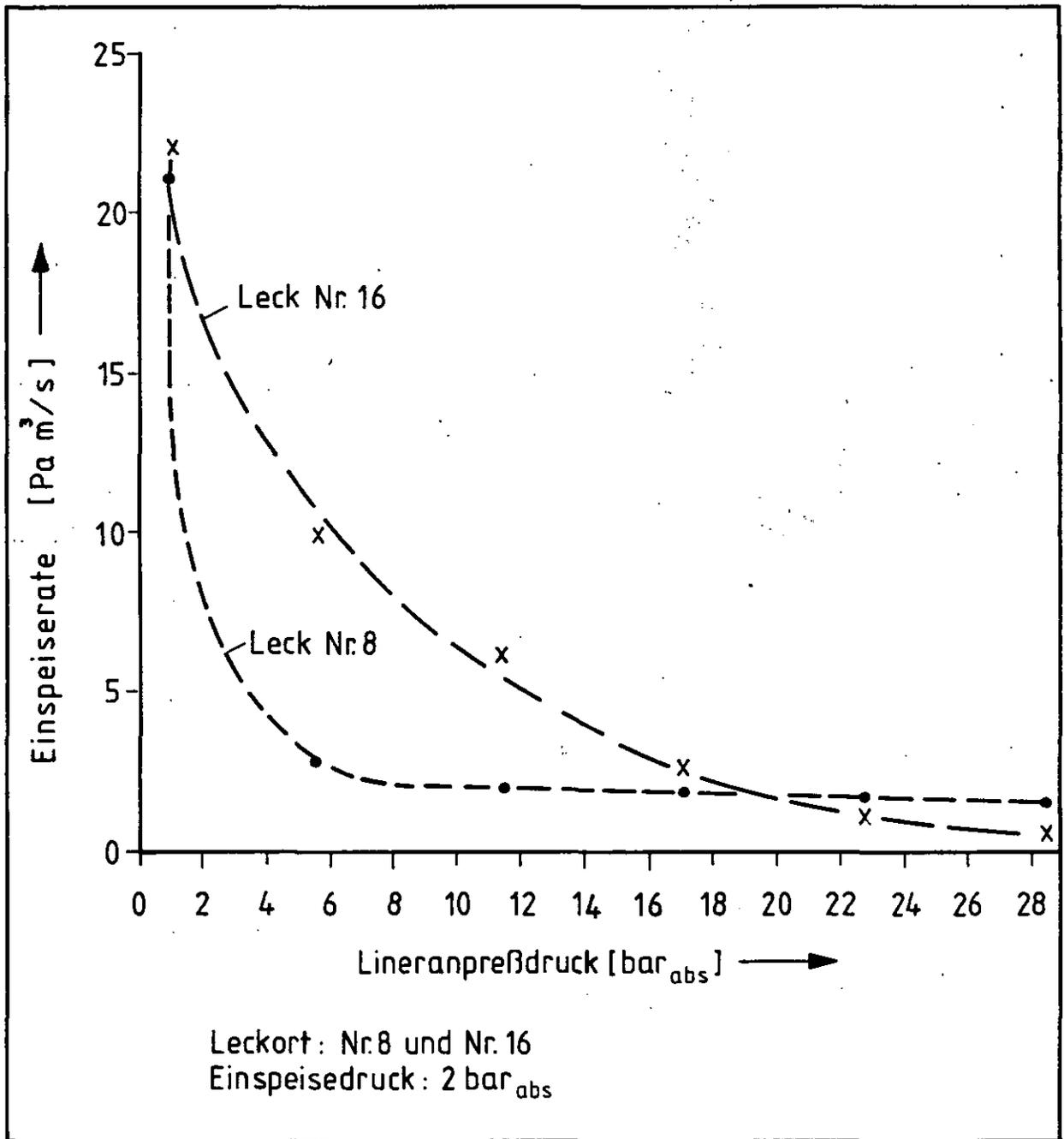
Aus dem Beton freigesetzte Wassermenge als Funktion der Absaugzeit
 Linertemperatur: 120°C



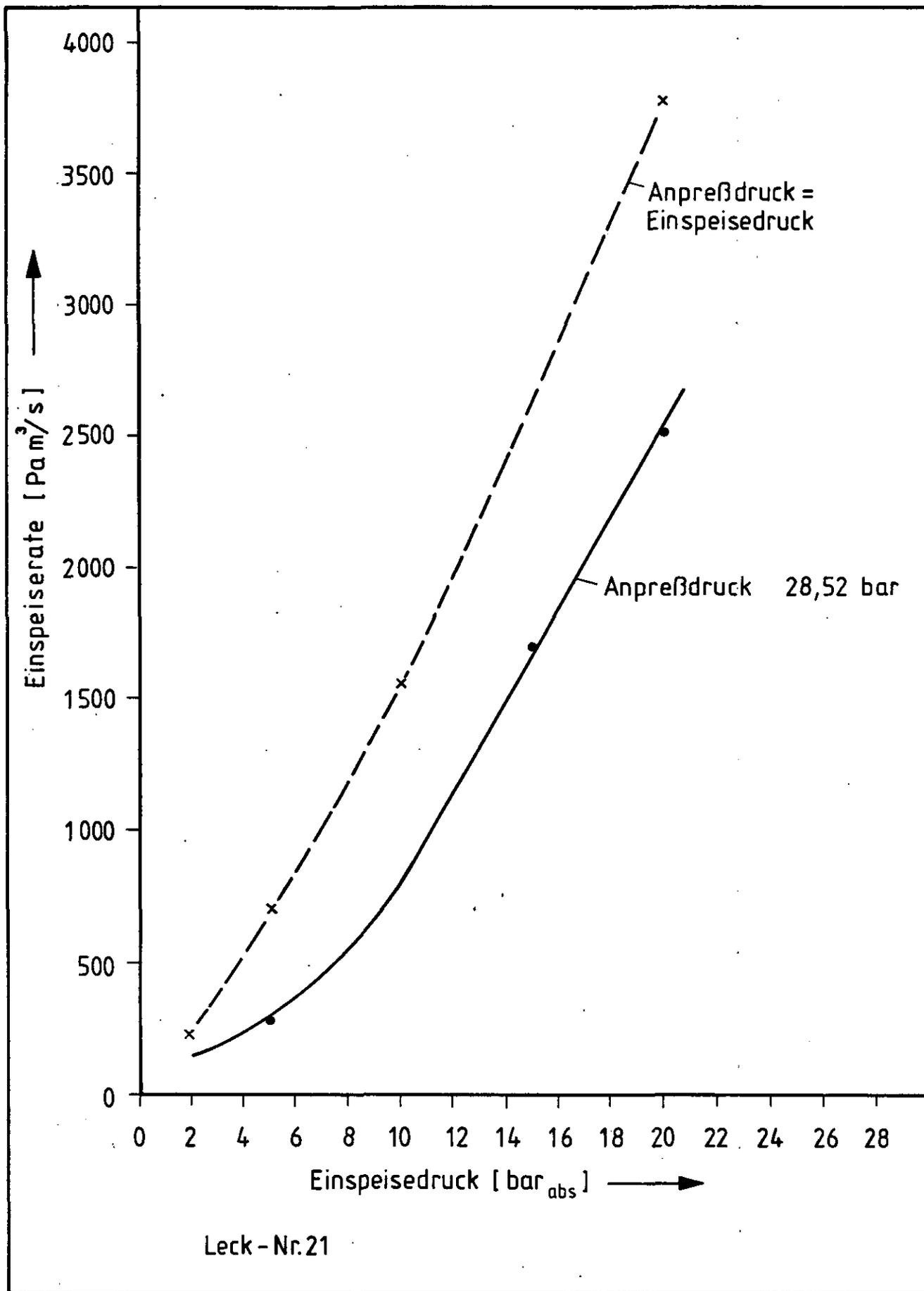
Druckverteilung im Beton und am Liner bei Heliumeinspeisung und einer Linertemperatur von 120°C



Leckeinspeiseraten in Abhängigkeit vom Lineranpreßdruck



Leckeinspeiserate in Abhängigkeit vom Lineranpreßdruck



Leckeinspeiseraten in Abhängigkeit vom Einspeisedruck bei unverändertem Lieranpreßdruck sowie unter gleichen Einspeise- und Anpreßdrücken



Abb. 29: Gasausströmen aus den lecknahen Kanälen

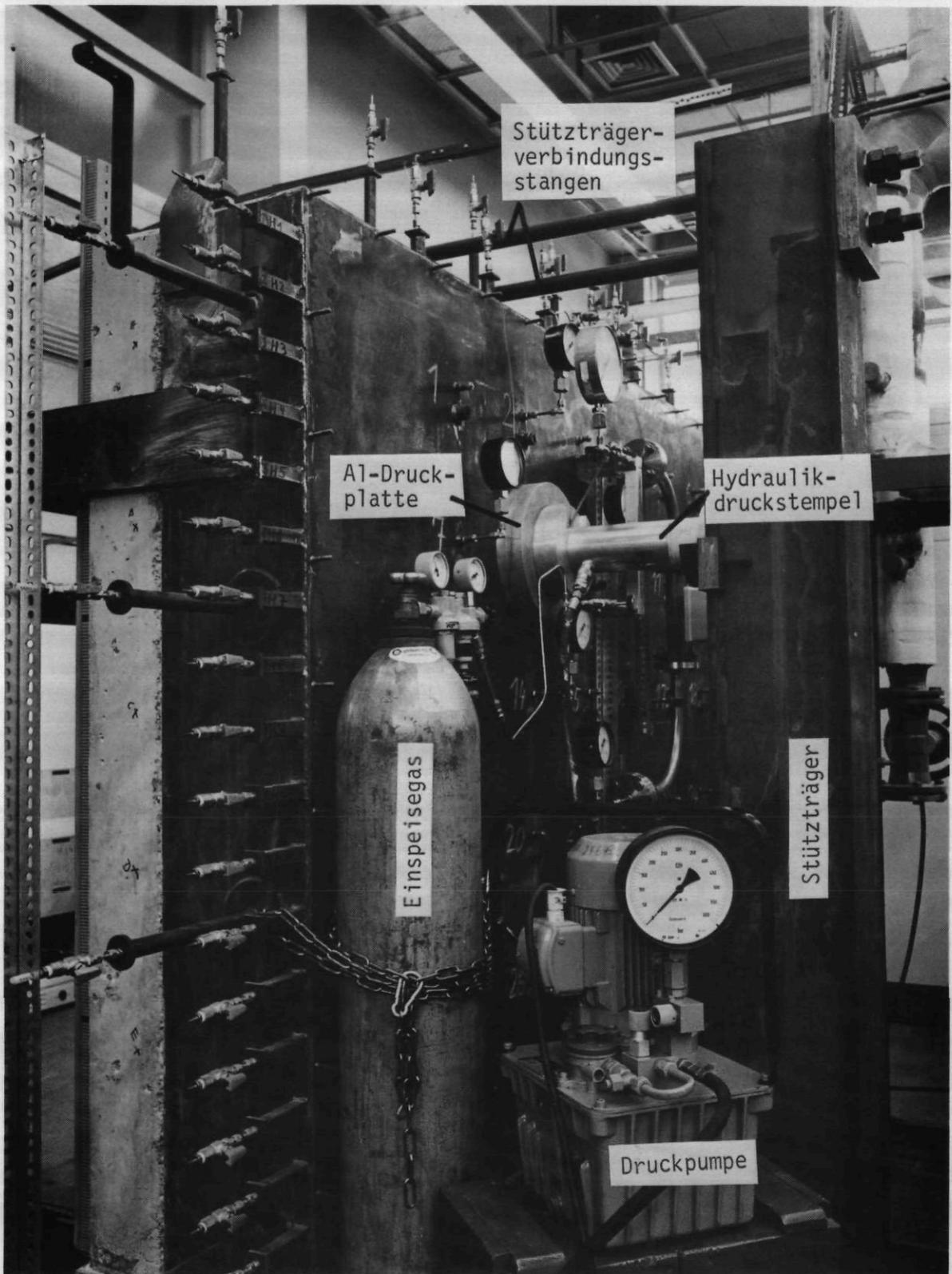
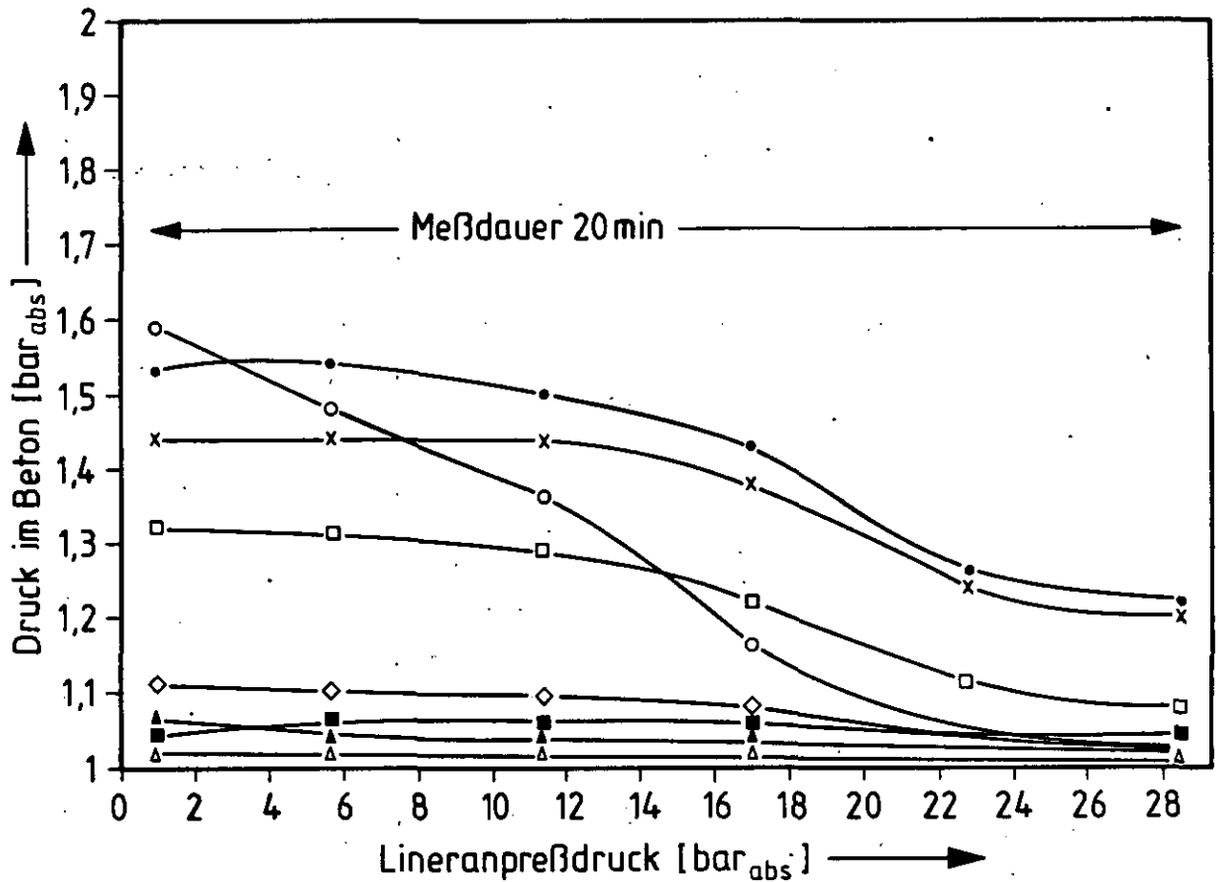


Abb. 30: Lineranpreßvorrichtung



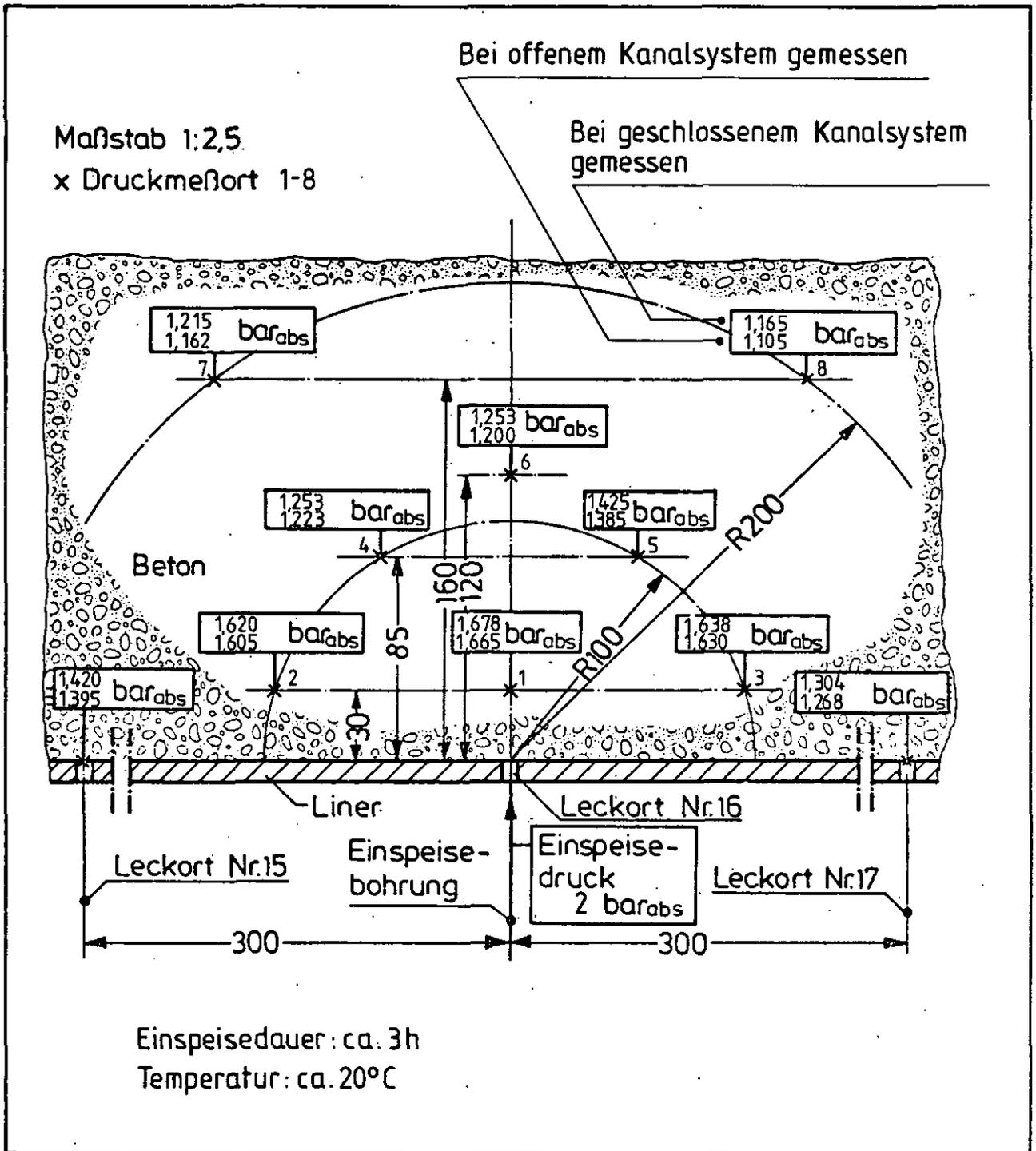
Anordnung siehe Abb.10

- Meßpunkt 1
- x Meßpunkt 2
- Meßpunkt 3
- △ Meßpunkt 4
- Meßpunkt 5
- ◇ Meßpunkt 6
- Meßpunkt 7
- ▲ Meßpunkt 8

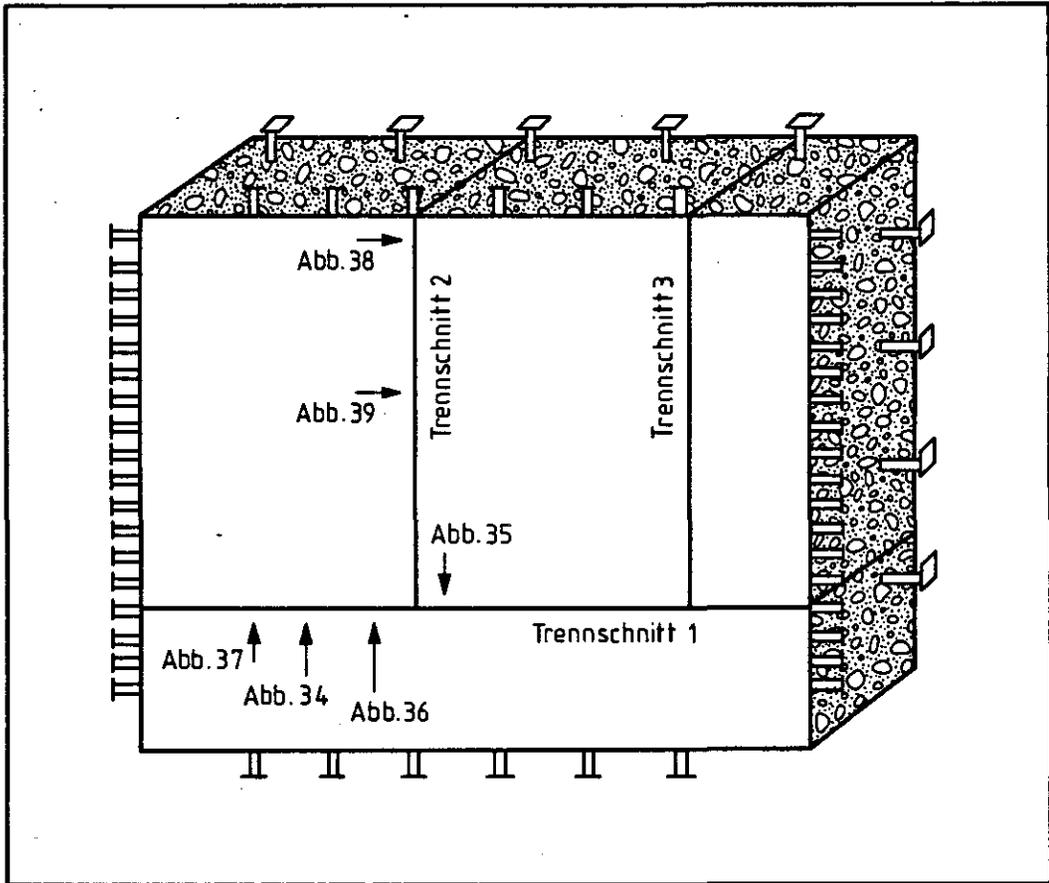
Leckort - Nr. 16

Einspeisedruck: 2 bar_{abs}

Druckabfall im Beton bei steigendem Lineranpreßdruck



Druckverteilung im Beton und am Liner bei Heliumeinspeisung nach dem Ver-
guß der am Liner befindlichen Kanäle



Anordnung der Trennschnitte und Positionsangaben zu den
Abbildungen 34 bis 39

Abb.:33



Abb. 34: Typische Poren- und Lunkerverteilung im Beton

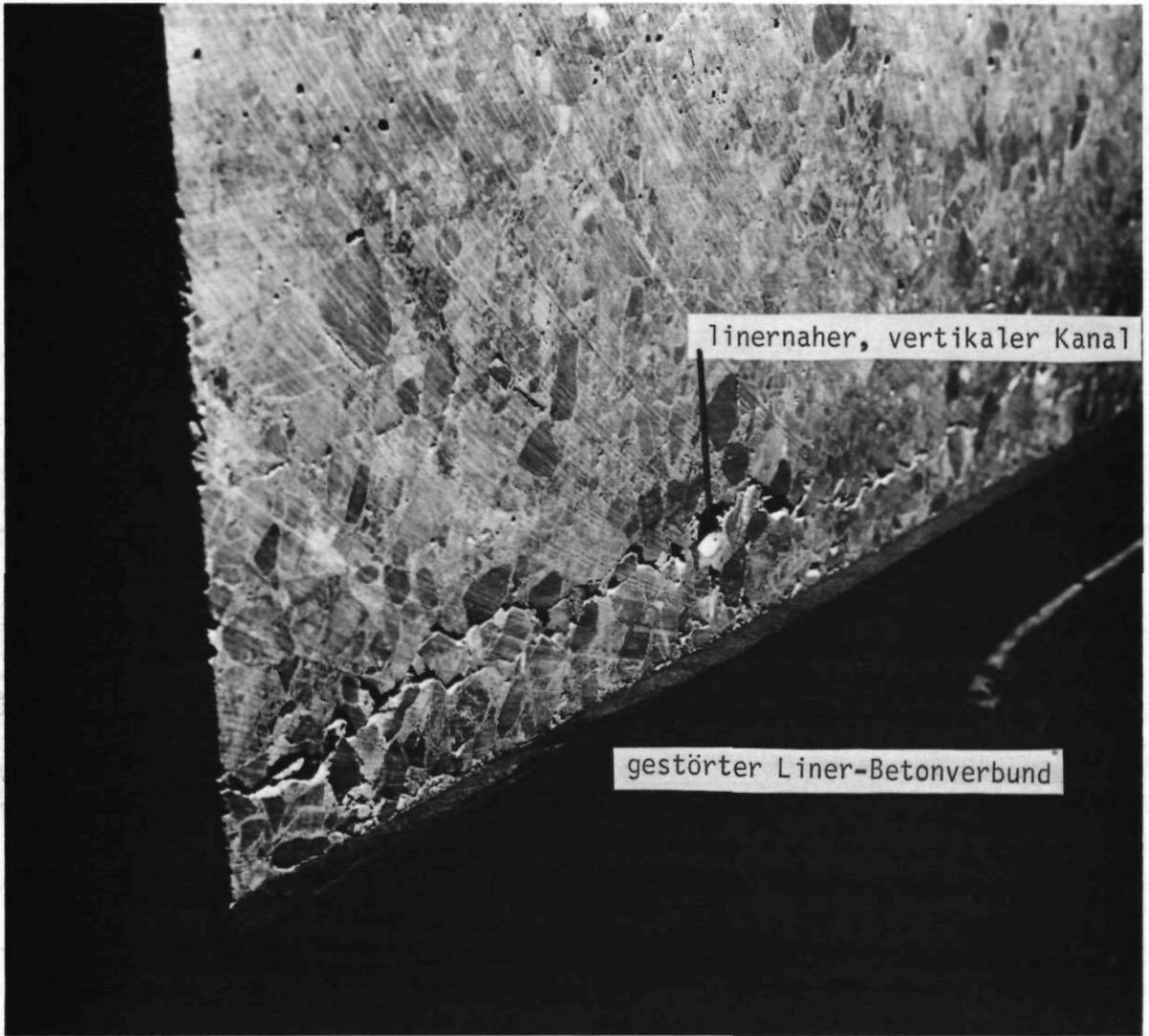


Abb. 35: Rißzone im linernahen Bereich



Abb. 36: Gestörter Liner-Beton-Kontakt



Abb. 37: Relativ ungestörter Liner-Beton-Kontakt



Abb. 38: Teilansicht einer Schnittfläche durch das Versuchsmodell

Betonierichtung

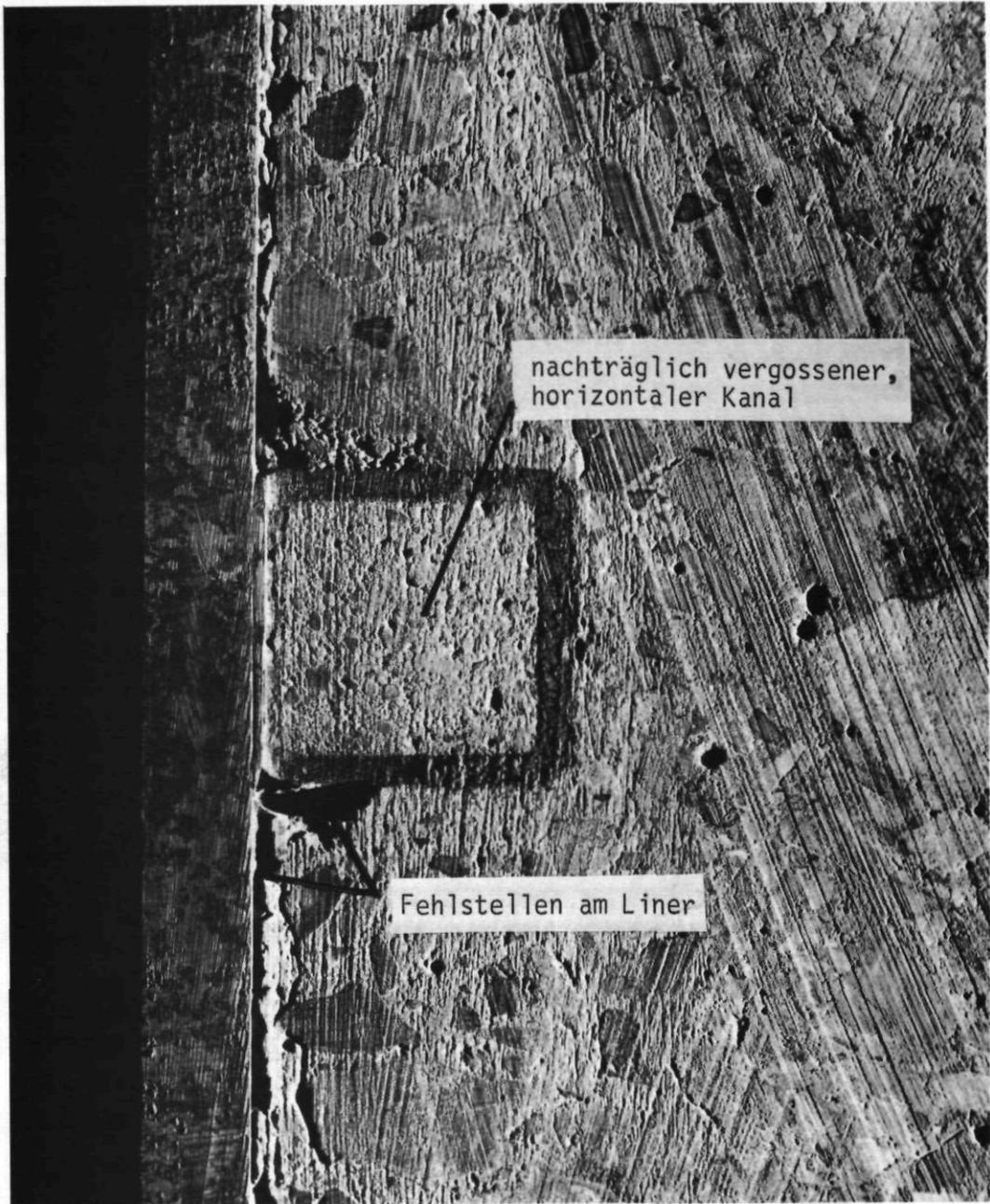


Abb. 39: Typische Betonfehlstelle unter einem Kühlrohr