

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Direktoren:
Prof. Dr.-Ing. K. Kordina
Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

**Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton
aus dem Wassereindringverhalten**

von Joachim Steinert

HEFT 38

BRAUNSCHWEIG

Unveränderter Nachdruck der Erstveröffentlichung als Band 7 der ZIVIL-SCHUTZFORSCHUNG – Schriftenreihe der Schutzkommission beim Bundesminister des Innern. Herausgegeben vom Bundesamt für Zivilschutz. Osang Verlag, Bad Honnef, 1977.

ZIVILSCHUTZFORSCHUNG

Band 7

Zivilschutz- Forschung

Schriftenreihe der Schutzkommission beim Bundesminister des Innern

Herausgegeben vom Bundesamt für Zivilschutz

Band **7**

B I B L I O T H E K

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

der Technischen Universität Braunschweig

Beethovenstraße 52

D-3300 Braunschweig

Dr.-Ing. Joachim Steinert

Bestimmung der
Wasserdurchlässigkeit
von Kiesbeton aus dem
Wassereindringverhalten

Osang

Herausgeber: Bundesamt für Zivilschutz

5300 Bonn 2

Deutschherrenstraße 93–95

Redaktion: C. Maier

Die Arbeit gibt die Meinung des Autors wieder und muß nicht
unbedingt mit der Auffassung des Herausgebers übereinstimmen.

Der Autor ist Akademischer Direktor am
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
der Technischen Universität Braunschweig

Geschäftsführender Direktor: o. Prof. Dr.-Ing. Karl Kordina

ISBN 3-7894-0056-4, ISSN 0343-5164

© 1977 by Bundesamt für Zivilschutz, Bonn

Verlag: Osang Verlag Bad Honnef-Erpel

Fotosatz und Offsetdruck: Volksfreund-Druckerei Nik. Koch, Trier

Inhalt

1. Einleitung	7
2. Grundlagen	9
3. Experimentelle Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wassereindringtiefe und Eindringmenge	13
3.1 Vorbemerkung	13
3.2 Versuchsdurchführung	14
3.3. Untersuchungsergebnisse	18
4. Entwicklung und Erprobung einer transportablen Versuchsapparatur	25
4.1 Vorbemerkung	25
4.2 Transportable Versuchsapparatur	25
4.3 Versuchsdurchführung	27
4.4 Untersuchungsergebnisse	31
5. Bestimmung der Wasserdichtigkeit älterer Schutzbauten	38
5.1 Auswahl der Bauten	38
5.2 Versuchsdurchführung	40
5.3 Untersuchungsergebnisse	44
6. Zusammenfassung und Ausblick	47
Literaturhinweise	49
Register	57

1. Einleitung

Von Schutzbauten wird gefordert, daß sie gegen radioaktive Niederschläge, gegen Brandeinwirkungen sowie gegen biologische Kampfmittel und chemische Kampfstoffe schützen und für einen längeren Aufenthalt geeignet sind. Da ein Katastrophenfall möglicherweise erst Jahrzehnte nach Errichtung des Schutzraumes eintritt, kann diese lange Standzeit die Eigenschaften des zu seiner Herstellung verwendeten Stahlbetons ungünstig beeinflussen. Insbesondere kann der Kiesbeton aus der Zeit um 1940 stammender Schutzbauten durch ungünstige Zusammensetzung infolge Verwendung minderwertiger Zuschläge, zum Beispiel Schlacken, oder infolge mangelhafter Verdichtung, zum Beispiel durch Stochern, oder durch Entstehung von Kiesnestern bei zu großer örtlicher Konzentration der Bewehrungsstäbe eine geringe Wasserdichtigkeit aufweisen, die zu einer Durchfeuchtung und damit gegebenenfalls mit dem Wasser zu einem Eintritt von biologischen oder chemischen Kampfstoffen in den Schutzraum führen könnte, was insbesondere für den Fall einer Wiederinbetriebnahme derartiger Schutzbauten von Bedeutung ist.

Naturgemäß erfolgt eine Durchfeuchtung nicht kurzfristig mit Beginn der Wasserbeanspruchung, sondern erst nach Stunden oder Tagen, je nach anstehendem Wasserdruck, Dicke der Bauteile und Porosität des Betons. Da jedoch Großschutzräume einen Daueraufenthalt von 14 Tagen erlauben sollen, ist auch eine langfristige Wasser- und – mehr noch – Gasdichtigkeit erforderlich. Verständlicherweise ist die Dichtigkeit besonders gefährdet, wenn die Außenbauteile der Schutzräume zusätzlich noch Risse infolge äußerer Einwirkungen oder durch Zwängungsspannungen aufweisen, was auch bei erst in neuester Zeit errichteten Schutzbauten mitunter der Fall ist.

Grundsätzlich wäre es sinnvoll, alle Schutzbauten aus wasserundurchlässigem Beton gemäß DIN 1045 herzustellen. Wichtigster Gesichtspunkt ist hierbei eine Begrenzung des Wasserzementwertes: $W/Z \leq 0,6$. Darüber hinaus müssen an die Sieblinie der Zuschlagstoffe und die Verdichtung bestimmte Anforderungen gestellt werden. Hinsichtlich des zuletzt genannten Punktes können sich jedoch Schwierigkeiten ergeben: Je geringer der Wasserzementwert der Betone ist, desto steifer ist ihre Konsistenz, und daher bergen Bauteile mit hohem Bewehrungsgehalt, wie sie für Schutzräume erforderlich sind, mit zahlreichen Zwickeln und anderen schwer zugänglichen Stellen im Betonstahlgeflecht in erhöhtem Maße die Gefahr von Verdichtungsmängeln in sich. Deshalb sind geeignete Betonverflüssiger zu verwenden.

Angesichts dieser Probleme schien es notwendig, die bei älteren Schutzbauten derzeit noch gegebene Wasserdichtigkeit auf der Grundlage einer direkten Prüfung zu ermitteln. Die Entwicklung einer derartigen Prüfmethode, ihre Anwendung und die erzielten Ergebnisse beschreibt die vorliegende Arbeit, der ein mehrjähriges, vom Bundesamt für Zivilschutz gefördertes Forschungsvorhaben zugrunde liegt:

1974: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wassereindringtiefe (Wasserdurchlässigkeit nach DIN 1048) und Eindringverhalten – siehe Abschnitte 2 und 3.

1975: Entwicklung und Labor-Erprobung eines Meßgerätes zur Ermittlung der Wassereindringung in Schutzraum-Betone – siehe Abschnitt 4.

1976: Bestimmung der Wasserdichtigkeit älterer Schutzbauten – siehe Abschnitt 5.

Um begriffliche Mißverständnisse auszuschließen, sei hier daran erinnert, daß es sich bei der Wasserdurchlässigkeit um einen stationären Zustand handelt, während die erwünschte Wasserundurchlässigkeit ein instationärer Wassereindringvorgang ist, der die Begrenzung auf eine maximale Wassereindringtiefe zum Ziele hat.

Nach DIN 1048 wird die Wasserundurchlässigkeit von Beton geprüft, indem eigens zum Zweck dieser Prüfung hergestellte Probekörper über 96 Stunden einem stufenweise erhöhten Wasserdruck zwischen 1 bar und 7 bar ausgesetzt, im Anschluß hieran aufgespalten und die Druckwasser-Eindringtiefe sowie -verteilung in einem einzigen Querschnitt festgestellt werden: Der Beton gilt nach DIN 1045 als wasserundurchlässig, sofern hierbei die an drei Prüfkörpern ermittelte Eindringtiefe 5 cm nicht überschreitet. Erweist sich jedoch ein Probekörper als wasserdurchlässig, wird durch Beobachtung ermittelt, bei welcher Druckstufe und nach welcher Zeit die Durchfeuchtung eintritt, wobei die Durchlässigkeit nach rein qualitativen Merkmalen beschrieben wird.

Im Beton ist nach Beendigung des Abbindeprozesses die hierzu erforderliche, vom Zementanteil abhängige Wassermenge chemisch oder in Gel- und Kapillarporen physikalisch gebunden. Bei größeren W/Z-Werten wird das nicht benötigte Überschußwasser durch Kapillarleitung und Diffusion allmählich zur Oberfläche transportiert, wo es verdunstet. Somit besitzt älterer Beton, beziehungsweise Zementstein im allgemeinen ein Porensystem, dessen Durchlässigkeit sich zeitlich nicht mehr wesentlich ändert und das deshalb mit einem konstanten Durchlässigkeitskoeffizienten zu beschreiben ist. Daher sollte es möglich sein, die Wassereindringtiefe aus der als Funktion der Zeit ermittelten Eindringmenge herzuleiten und auf dieser Grundlage ein Prüfverfahren zu entwickeln, das nicht auf die Aufspaltung speziell hergestellter Prüfkörper angewiesen ist, sondern auch an realen Bauten, hier in erster Linie Schutzbauten, angewendet werden kann.

Dabei ist jedoch zu beachten:

Die Durchlässigkeit oder Dichtigkeit eines Bauteils wird nicht nur von der gewählten Betonmischung, sondern wesentlich von deren Verdichtung und den Austrocknungsmöglichkeiten in frühem Betonalter (Schwindrisse!) abhängen und daher möglicherweise von Prüfort zu Prüfort stärker variieren als bei gleichverdichteten und -gelagerten Probewürfeln. Eine Vergrößerung der Stichprobenanzahl ist daher wünschenswert.

Eine handliche, tragbare Prüfapparatur wird stets nur zu einer lokalen Prüfung taugen, das heißt als Punkt-Wasserquelle begrenzter Ergiebigkeit anzusehen sein und nicht den Fall einer flächenhaften Druckwasserbeanspruchung, wie sie bei einem im Grundwasser stehenden Schutzbau vorhanden ist, zu simulieren gestatten.

Je dicker die zu prüfenden Stahlbetonteile eines Schutzraumes aus gegebenemfalls stark wassersaugendem Beton sind, um so mehr wird die hinsichtlich der Auswertung als eindimensional gedachte Prüfung das Meßergebnis verfälschen.

Grundsätzlich war beabsichtigt, den Grad der noch vorhandenen Wasserundurchlässigkeit der Schutzraumbetone mit dem 5-cm-Kriterium der DIN 1045 nach-

zuweisen und nicht deren Durchlässigkeit. Daher wurde die Meßapparatur für eine Wassereindringtiefe von maximal 12 cm konzipiert und nicht für Tiefen, die den Dicken üblicher Schutzraumaußenwände entsprechen (≥ 30 cm). Mit der Anlehnung an DIN 1048 lagen aber auch die zu verwendenden Prüfdrücke fest: 1, 3 und 7 bar, die somit keinen unmittelbaren Rückschluß auf reale Verhältnisse – etwa den durchschnittlichen Grundwasserdruck – erlauben.

2. Grundlagen

Der stationäre Durchfluß q , das heißt die auf Zeit- und Flächeneinheit bezogene Wassermenge $g = m/q$, die infolge einer Druckdifferenz $p = p_1 - p_2$ zu beiden Seiten einer Betonplatte der Dicke d durch die Platte hindurchströmt, wird im allgemeinen mit der Darcyschen Filtergleichung beschrieben:

$$(1) \quad q = \frac{g}{F \cdot t} = \frac{k}{d} \cdot p.$$

Die Größe k wird als Durchlässigkeitskoeffizient bezeichnet; k besitzt die Einheit cm/s. Die Durchlässigkeit von ideal verdichtetem Beton ist durch die Porosität des Zementsteins gegeben und diese wiederum von Wasserzementwert, Lagerung und Alter abhängig, siehe Bild 1.

Bei kleinen Durchlässigkeiten ist die Bestimmung des Koeffizienten k aus dem stationären Durchfluß

$$(2) \quad k = \frac{d}{p} \cdot q$$

zeitaufwendig und ungenau, eventuell sogar unmöglich. In diesen Fällen ist es sinnvoller, in vorgegebenen Zeitschritten den instationären Wassereindringvorgang bis zu einer begrenzten Tiefe e zu verfolgen. Zur Ermittlung dieser Wassereindringtiefe ist allerdings ein Spalten der Prüfkörper erforderlich oder, wie Valenta vorgeschlagen hat [2], eine Einbettung der Prüfkörper in Gehäuse aus transparentem, jedoch dicht umschließendem Material.

Für das zeitliche Fortschreiten der Wassereindringfront gilt unter Vernachlässigung von Kapillarkräften

$$(3) \quad \frac{de}{dt} = \frac{k}{e(t)} \cdot (p_1 - p_2) = \frac{k}{e} \cdot p.$$

Aus Gleichung (3) ergibt sich durch Integration unter Beachtung der Anfangsbedingung die Eindringtiefe

$$(4) \quad e(p, t) = \sqrt{2kpt},$$

also ein linearer Zusammenhang zwischen e und \sqrt{t} .

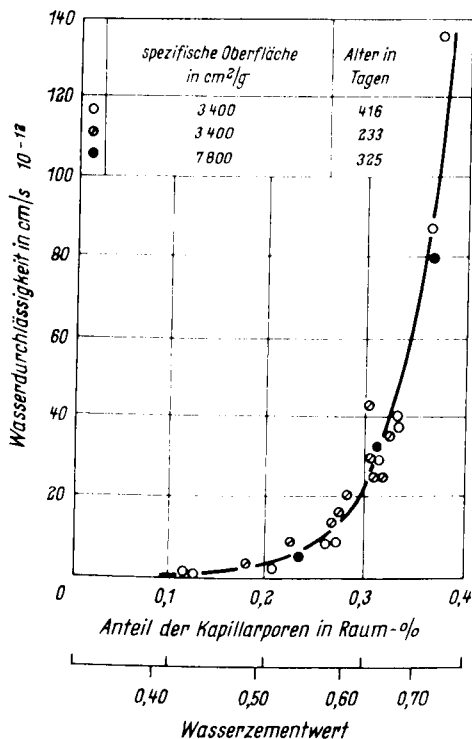


Bild 1: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit vom W/Z-Wert nach T. C. Powers [1].

Im realen Versuch gilt diese Gleichung zunächst nur für den Mittelwert der Wassereindringfront \bar{e} , der je nach Betonzusammensetzung von der Porengröße und -verteilung bestimmt wird, während die örtlichen Schwankungen der Eindringtiefe e von der Verdichtung und anderen Parametern abhängen. Da man jedoch aus grundsätzlichen Erwägungen die maximale Eindringtiefe e_{\max} zu ermitteln versucht, muß durch Versuche geprüft werden, ob auch hierfür eine lineare Abhängigkeit von \sqrt{t} besteht, was jedoch durch Untersuchungsergebnisse von Bonzel nahegelegt wird [1].

Die in eine Fläche der Größe F eindringende Wassermenge g ist, in Abhängigkeit von der Zeit, gegeben durch

$$(5) \quad g = \frac{m}{Q} = Fu_v e = Fu_v \sqrt{2k_p} \cdot \sqrt{t} = A \sqrt{t},$$

wobei u_v der sich durch die Druckwasserbeanspruchung im Beton einstellende volumetrische Feuchtigkeitsgehalt ist. Ein von der jeweiligen Betonmischung unabhängiger Zusammenhang zwischen g und \bar{e} kann nur existieren, wenn u_v eine Konstante ist.

Der Proportionalitätsfaktor zwischen g und \sqrt{t} ,

$$(6) \quad A = Fu_v \sqrt{2k_p},$$

wird Wassereindringzahl genannt.

Nach Gleichung (4) läßt sich also der Durchlässigkeitskoeffizient k auch aus der Wassereindringung ermitteln:

$$(7) \quad k = \frac{e^2(p, t)}{2pt}.$$

Die Eindringtiefe e_{Norm} , die sich bei Prüfungen mit stufenweiser Drucksteigerung $p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_3$ – wie im Verfahren nach DIN 1048 – ergibt, ist nach Valenta [2] die Wurzel aus der Summe der einzelnen quadratischen Eindringwerte nach der Gesamtzeit $t_{\text{ges}} = t_1 + t_2 + t_3$:

$$(8) \quad e_{\text{Norm}} = \sqrt{2k(p_1 t_1 + p_2 t_2 + p_3 t_3)} = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2},$$

das heißt, die einzelnen Druckstufen p_1 werden entsprechend ihrem Zeitanteil t_i gewichtet, so als ob über die gesamte Prüfdauer t_{ges} ein effektiver Druck $p_{\text{eff}} = \sum \frac{p_i t_i}{t_{\text{ges}}}$ vorhanden wäre. Nach DIN 1048 sind für die Zeiten 48, 24 und 24 Stunden und für die zugehörigen Drücke 1, 3 und 7 bar einzusetzen. Wollte man – ausgehend von gleichen Beobachtungszeiten bei den drei Drücken! – bei jeder Druckstufe gleiche Werte für aufgenommene Wassermenge oder Eindringtiefe erreichen, müßten die Druckstufen 1, 3 und 5 bar gewählt werden.

Die sich im Norm-Versuch ergebende Wassermenge läßt sich entsprechend Gleichungen (5) und (8) verstehen als

$$(9) \quad g_{\text{Norm}} = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2},$$

wobei g_1 , g_2 und g_3 die Wassereindringmengen bei alleiniger Anwendung der Drücke p_1 , p_2 und p_3 über die jeweiligen Zeitdauern t_1 , t_2 und t_3 bedeuten. Die Summe der im Versuch bei den einzelnen Drücken ermittelten Eindringmengen

$$(10) \quad g_{\text{Norm}} = g_1 + g_2 + g_3 = g_1 + (\sqrt{g_1^2 + g_2^2} - g_1) + (\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2} - \sqrt{g_1^2 + g_2^2})$$

entspricht Gleichung (9).

Es ergibt sich somit theoretisch die Möglichkeit, aus Konstant-Druckversuchen auf die Ergebnisse von Norm-Versuchen zurückzuschließen. Beispielsweise ergibt sich aus Messungen mit einem Druck von 1 bar über eine Dauer von 24 Stunden:

$$(11) \quad e_{\text{Norm}} = e_{1,24} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 48 + 3 \cdot 24 + 7 \cdot 24}{24}} = 3,46 \cdot e_{1,24}.$$

Allerdings sollte man nicht ohne weiteres damit rechnen, daß eine Reduktion des Druckes auf einen beliebigen Wert besonders gut mit dem Norm-Versuch übereinstimmende Ergebnisse liefert; möglicherweise ist eine bessere Übereinstimmung vorhanden, wenn die Norm-Drücke beibehalten werden und dafür die Versuchsdauer von 24 bzw. 48 Stunden auf nur 4 Stunden herabgesetzt wird:

$$(12) \quad e_{\text{Norm}} = e_{137,4} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 48 + 3 \cdot 24 + 7 \cdot 24}{1 \cdot 4 + 3 \cdot 4 + 7 \cdot 4}} = 2,56 \cdot e_{137,4}.$$

Im Rahmen dieser Betrachtungen ist auch der Fall einer Durchfeuchtung allein durch kapillaren Wassertransport von Bedeutung. Es ist theoretisch möglich und hier auch an längere Zeit gewässerten Norm-Versuchsplatten großer Porosität beobachtet worden, daß die dem Druckversuch vorausgehende Wasserlagerung bereits zu einer erheblichen Durchfeuchtung führt, so daß während der Druck-Wasserbeanspruchung bereits wieder eine Entfeuchtung an der Probenrückseite erfolgt.

Kapillarleitung entgegen der Schwerkraft ist bekanntermaßen bis zu einer maximalen Steighöhe h_0 möglich, die jedoch theoretisch erst nach unendlich langer Zeit erreicht wird. Der Vorgang des kapillaren Saugens kann durch die folgende Differentialgleichung beschrieben werden

$$(13) \quad \frac{de}{dt} = k \cdot \frac{h_0 - e(t)}{e(t)},$$

deren Lösung für die Anfangsbedingung $e(t = 0) = 0$ auf folgende Gleichung für die Saughöhe $e(t)$ führt:

$$(14) \quad kt + e = h_0 \ln \frac{h_0}{h_0 - e} \approx h_0 \left(\frac{e}{h_0} + \frac{e^2}{2h_0^2} + \dots \right)$$

also für $e \ll h_0$: $kt = \frac{e^2}{2h_0}$ oder $e = \sqrt{2kh_0 t}$, vergleiche Gleichung (4).

Die Auswertung dieser Gleichung ergibt beispielsweise eine Steighöhe $e = 6$ cm bei $h_0 = 12$ cm in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitskoeffizienten nach folgenden Zeiten:

k in cm/s	t_6 cm
10^{-9}	73,5 Jahre
10^{-8}	7 Jahre + 4 Monate
10^{-7}	268 Tage
10^{-6}	27 Tage

Es ist also bei wasserdurchlässigen Betonen durchaus möglich, im Rahmen üblicher Lagerungszeiten eine völlige Durchfeuchtung allein durch kapillare Wasserbewegung zu erzielen. Die obengenannten Durchlässigkeitskoeffizienten entsprechen dem Wertebereich der in diesem Vorhaben untersuchten Betone.

Bei der Beschreibung der kapillaren Wasserbewegung wird üblicherweise nicht der Durchlässigkeitskoeffizient k , sondern der kapillare Reibungskoeffizient R verwendet:

$$(15) \quad R = \frac{1}{k} = \frac{8\nu}{g \cdot r^2}$$

mit ν = kinematische Zähigkeit

r = Porenradius

g = Erdbeschleunigung = 981 cm/s².

Damit ergibt sich die Wassereindringzahl im Saugversuch zu

$$(16) \quad A = Fu_v \sqrt{2k h_0}.$$

Es sollte also zumindest näherungsweise möglich sein, die Wassereindringtiefe auf einfachste Weise aus einem Wassersaugversuch zu ermitteln. Praktische Untersuchungen in dieser Richtung sind meines Wissens bisher noch nicht durchgeführt worden.

3. Experimentelle Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wassereindringtiefe und Eindringmenge

3.1. Vorbemerkung

Um Verwechslungen vorzubeugen, werden in den Tabellen 1 und 2 die zur Kennzeichnung der Versuchskörper und der Versuchsdurchführung verwendeten Benennungen definiert.

Abmessungen senkrecht zur Druckrichtung des Wassers in cm	Abmessungen in Druckrichtung des Wassers in cm	Benennung der Prüfkörper oder Versuchskörper
20 x 20	20	Würfel W
20 x 20	12	Platten P
20 x 20	2 ... 5	Scheiben S
90 x 70/90 x 46	46/70	Blöcke B
15 Ø	12	Zylinder Z

Tabelle 1: Versuchskörper

Prüfdruck in bar	Prüfdauer in Stunden		Benennung
	je Druckstufe	gesamt	
je Druckstufe 1, 3 oder 7	24, 48 oder 72		Konstantdruck-Versuche
nacheinander 1 – 3 – 7	4	12	Kurzzeit-Versuche
nacheinander 1 – 3 – 7	24*	72	Norm-Versuche

Tabelle 2: Versuchsdurchführung

*) das heißt, die in DIN 1048 vorgeschriebene Beanspruchungszeit von 48 Stunden bei 1 bar wurde i. a. auf 24 Stunden abgekürzt. Der dadurch verursachte Fehler bei der Eindringtiefe läßt sich mit Gleichung (8) zu 4,4% abschätzen, ist also im Rahmen der Versuchsstreuung vernachlässigbar. Diese Art der Versuchsdurchführung ebenfalls als Normversuch zu bezeichnen ist damit gerechtfertigt.

Die verschiedenen untersuchten Betonmischungen werden in chronologischer Reihenfolge durch eine arabische Ziffer mit vorangestelltem B bezeichnet: B1 ... B8.

3.2. Versuchsdurchführung

Zur Überprüfung der in Abschnitt 2 dargelegten Zusammenhänge zwischen Eindringtiefe einerseits und Eindringmenge andererseits sind die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt worden.

Aus 6 zu verschiedenen Zeiten hergestellten Betonmischungen – Zusammensetzung und Eigenschaften siehe Tabelle 3 – mit im wesentlichen 2 extrem unterschiedlichen Mischungsverhältnissen, die eine normale ($W/Z = 0,65$) und eine extreme ($W/Z = 0,95$) Wassereindringung erwarten ließen, wurden jeweils 15 Würfel mit 20 cm Kantenlänge hergestellt. Davon dienten je 3 Würfel zur Bestimmung der Druckfestigkeit und damit zur Kennzeichnung der Festbetoneigenschaften, während aus den restlichen 12 Würfeln durch Sägen die zur Prüfung der Wasserundurchlässigkeit in Anlehnung an DIN 1048 erforderlichen 12 cm dicken Platten und aus den Restabschnitten der einzelnen Gütewürfel 4 Satz à 3 Scheiben – Dicke $d \geq 2,5; \geq 3,5$ und $\geq 4,5$ cm – zur Bestimmung der stationären Wasserdurchlässigkeit gewonnen wurden. Insgesamt standen also je Betonmischung 24 Versuchskörper zur Verfügung.

Betonmischung		B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8
Mischungs-Nr.		386	413	44/74	45/74	51/74	52/74	65/75	66/75
Zement - Art u. Klasse		PZ 350 F	PZ 350 F	PZ 350 F	PZ 350 F	PZ 350 F	PZ 350 F	PZ 350 F	PZ 350 F
- Gehalt	kg/m ³	293	190	207	296	206	294	207	297
Wasser - Gehalt	kg/m ³	211	200	196	193	192	191	196	193
W/Z-Wert		0,72	0,95	0,95	0,65	0,93	0,65	0,95	0,65
Zuschlag - Geh., dav.	kg/m ³	1838	1906	1970	1861	1962	1849	1967	1869
- 0/1 oder 0/1	kg/m ³	37	-	-	37	-	37	-	37
- 0/3 - 0/2	kg/m ³	937	762	788	949	785	943	787	953
- 3/7 - 2/8	kg/m ³	404	667	689	409	687	407	688	411
- 7/15 - 8/16	kg/m ³	276	286	296	279	294	277	295	280
- 15/30-16/32	kg/m ³	184	191	197	186	196	185	197	187
Konsistenz									
Ausbreitmaß	cm	37	37	37	35,5	37,5	35,5	38	36
Verdichtungsmaß		1,09	1,14	1,12	1,14	1,14	1,14	1,12	1,11
Frischbeton-Rohdichte	kg/dm ³	2,34	2,35	2,37	2,35	2,36	2,34	2,37	2,36
Festbeton - Rohdichte n. 28 Tagen	kg/dm ³	2,31	2,26	2,32	2,31	2,31	2,32	2,31	2,31
Druckfestigkeit nach 28 Tagen	N/mm ²	39,2	22,5	23,4	44,1	26,7	47,8	23,3	37,6

Tabelle 3. Zusammensetzung und Eigenschaften der Betone

Die Wasseraufnahme der Betone wurde außerdem noch durch die Lagerung beeinflusst: Bis zur Prüfung sind die ersten beiden Versuchsserien (Vorversuche) an der Luft und die weiteren Serien normgemäß unter Wasser gelagert worden.

Eine Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 war vorhanden, siehe Bild 2; sie ist mit Hochdruck-Widerstandsrohren zur Bestimmung der vom Prüfkörper unter Druck aufgenommenen Wassermenge ausgestattet. Durch die Verwendung konischer Wasservorratsbehälter können auch kleine Eindringmengen relativ genau bestimmt werden.

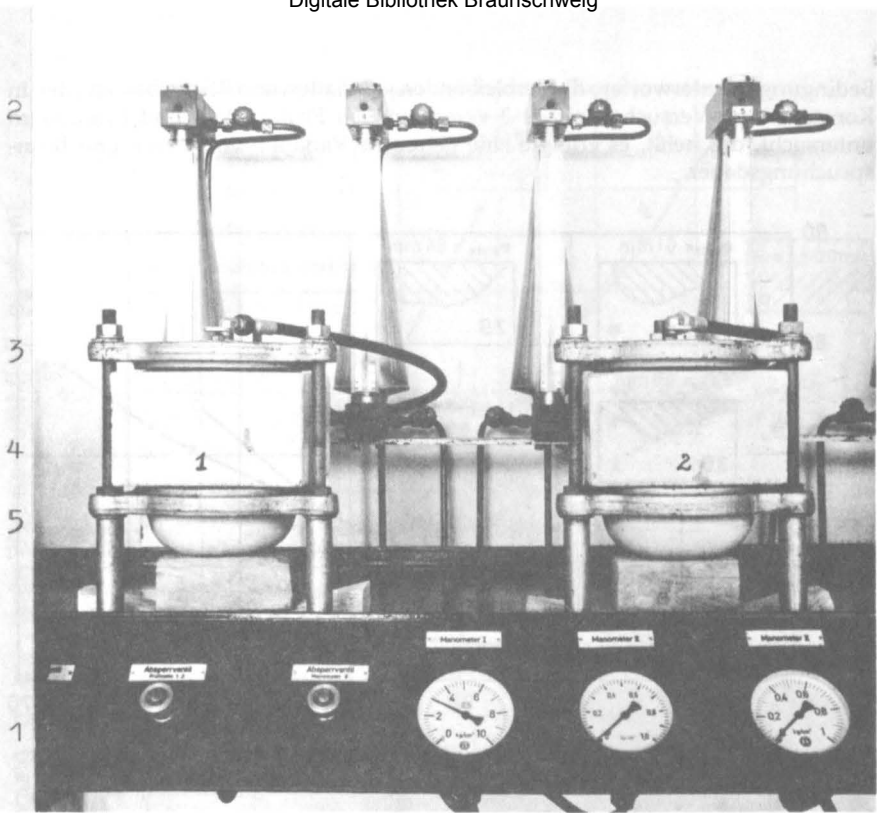


Bild 2: Prüfstand zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 1048:

1 Manometer für die Druckbereiche 1 und 10 bar
 2 Durchflußmesser Konusprinzip zur Verbesserung der Meßgenauigkeit im Bereich kleiner Durchflußmengen

3 Druckplatten Prüffläche kreisförmig mit 10 cm Durchmesser
 4 Prüfkörper 120 mm dicke Platten zur Begrenzung der Verdunstung unmittelbar unter dem Prüfkörper angeordnet.
 5 Auffangschale

Wie in Tabelle 4 zusammengestellt, wurden von den je Betonmischung vorhandenen 12 Platten und 12 Scheiben je 3 einem Wassereindringversuch unter Norm-

Prüfdruck in bar	Prüfdauer in Stunden		Anzahl der geprüften		Versuchsart
	je Druck- stufe	gesamt	Platten	Scheiben	
1-3-7	24	72	3	3	Norm-Versuch
1	24 48 72		je 1	je 1	Konstantdruck- Versuche
3	24 48 72		je 1	je 1	
7	24 48 72		je 1	je 1	

Tabelle 4: Versuchsprogramm

Bedingungen unterworfen; die verbleibenden je 9 Platten und 9 Scheiben wurden in Konstantdruck-Versuchen mit je 3 verschiedenen Prüfdrücken und Prüfdauern untersucht, das heißt, es erfolgte eine getrennte Variation von Druck und Beanspruchungsdauer.

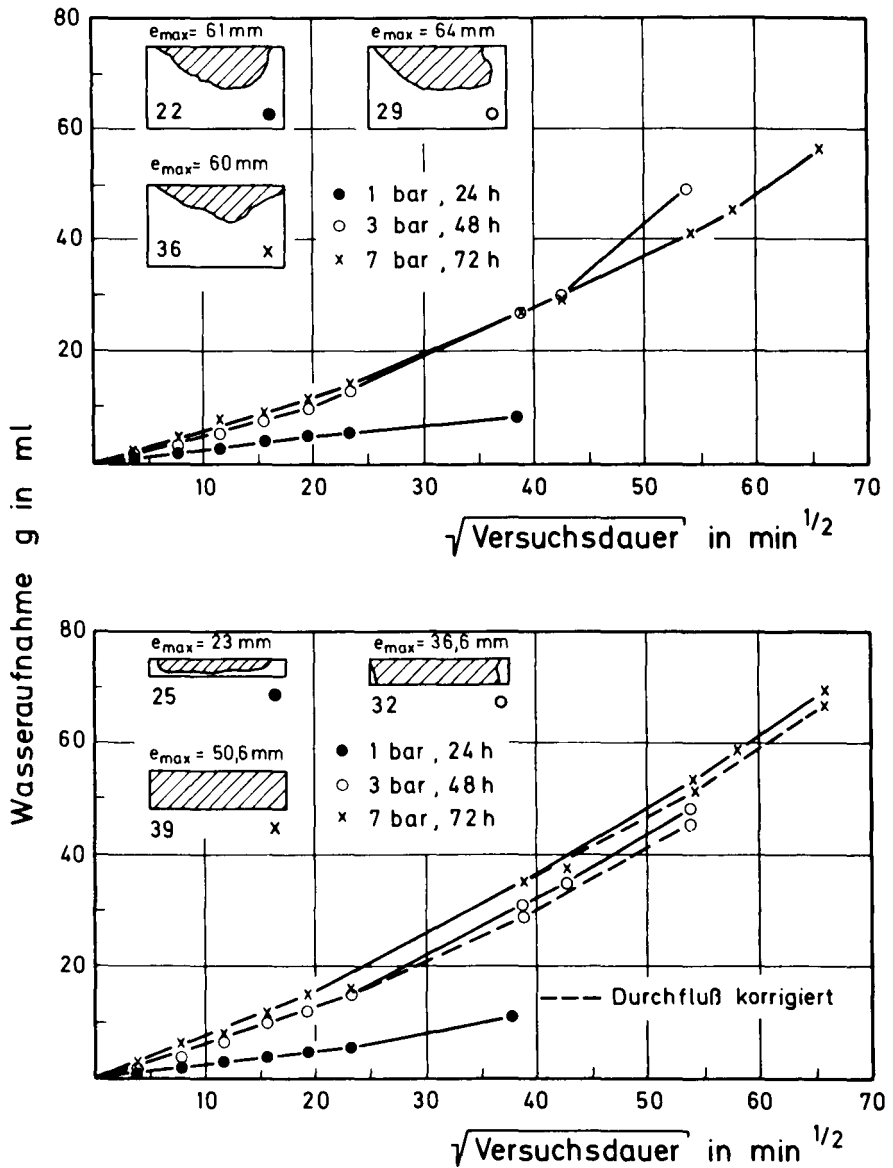


Bild 3: Beispiele für \sqrt{t} -proportionale Wasseraufnahme – ungünstiger Fall; i. a. wird noch bessere Linearität erreicht

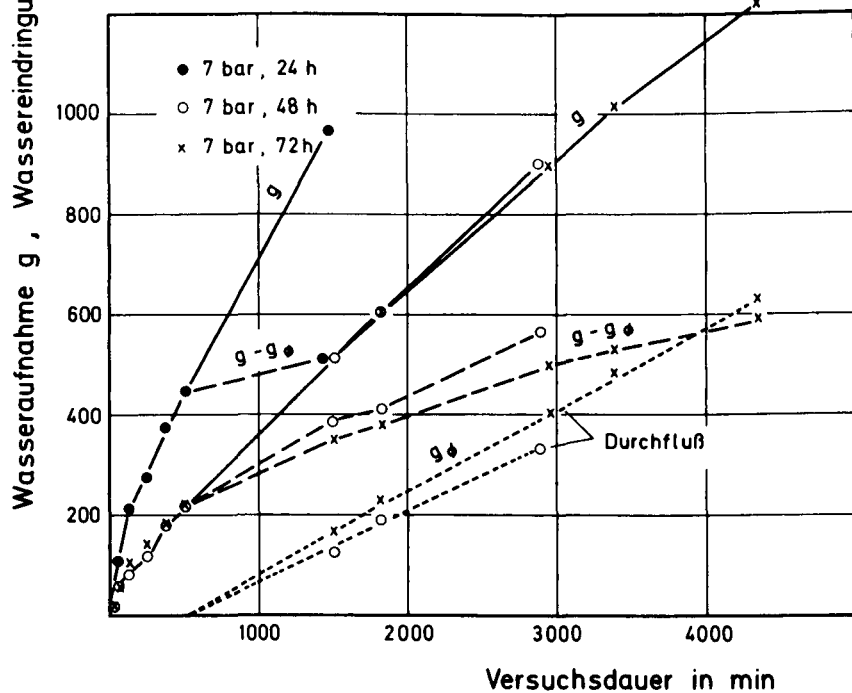
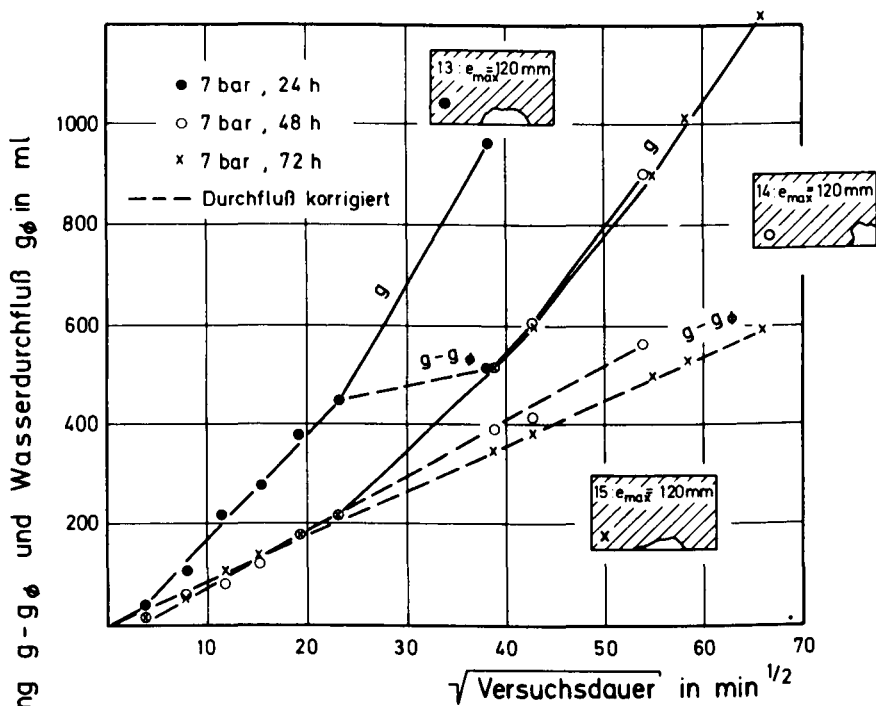


Bild 4: Beispiel für den Zeitmaßstab als Kriterium für Eindringung bzw. Durchfluß

Die Körper wurden vor Versuchsbeginn nochmals 24 Stunden im Prüfstand gewässert, um auch die annähernd drucklose Wasseraufnahme unter vergleichbaren Versuchsbedingungen zu ermitteln.

Bei der Messung der Wassereindringmenge als Funktion der Zeit wurden die Ablesezeiten entsprechend dem erwarteten \sqrt{t} -Gesetz gestaffelt, vergleiche Bild 3. Sofern die Scheiben eine stationäre Durchlässigkeit zeigten, ist neben der Registrierung der Eindringmenge g_{ges} auch die Durchflußmenge g_{Φ} gravimetrisch ermittelt worden. Bei der Auswertung ist durch Wahl unterschiedlicher Zeitmaßstäbe – Eindringung $\approx \sqrt{t}$, Durchfluß $\approx t$ – anhand der Meßergebnisse eine getrennte Beurteilung beider Phänomene möglich, vergleiche Bild 4. Bei Versuchsende wurden die Prüflinge aufgespalten und die Wassereindringtiefen \bar{e} und e_{max} ermittelt, siehe Bild 5.

Vorwiegend durch Unterschiede in der Entlüftung der Meßkammern bei den einzelnen Ablesungen stellte sich im Versuch nicht immer die ideale Abhängigkeit $g = A \cdot \sqrt{t}$ über den gesamten Beanspruchungszeitraum ein. Deshalb hat es sich als sinnvoll erwiesen, die gemessene Eindringtiefe e_{max} sowohl mit der tatsächlich ermittelten Wassermenge g_{ges} als auch – unter Vernachlässigung von offensichtlichen Falschmengen – mit der über \sqrt{t} gemittelten Menge g^* sowie mit der aus einem entsprechend bereinigten Wert für A gebildeten Größe $g_{\text{lin}} = A \cdot \sqrt{t}$ (= Wassereindringwert) zu vergleichen, siehe zum Beispiel Tabelle 12.

3.3. Untersuchungsergebnisse

Ziel der Untersuchungen war es, die in Abschnitt 2 dargelegten theoretischen Zusammenhänge experimentell zu prüfen, und zwar im Hinblick auf – die Ersetzbarkeit einer zerstörenden Eindringtiefenmessung durch eine nichtzerstörende Messung des Eindringverhaltens,

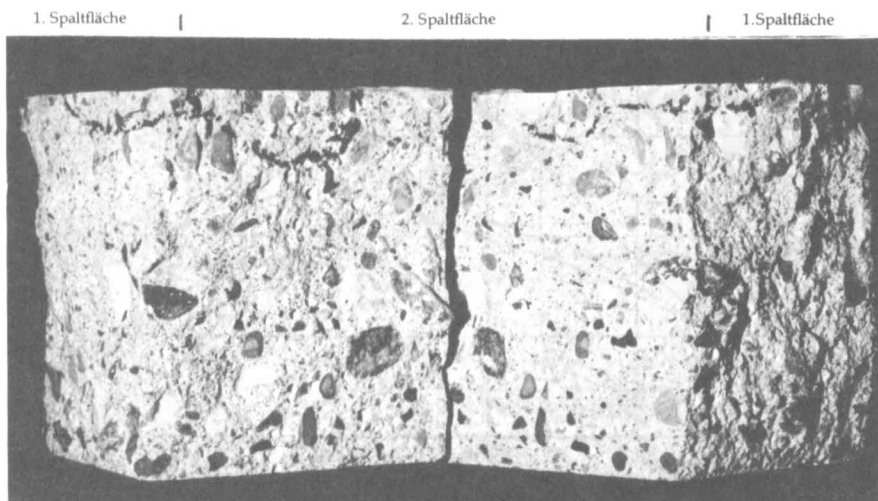


Bild 5: Prüfkörper nach Wassereindringversuch

Der Prüfkörper wurde zweiachsigal aufgespalten

1. Spaltfläche: $e_{\text{max}} = 12 \text{ mm}$
2. Spaltfläche: $e_{\text{max}} = 24 \text{ mm}$

- die Zulässigkeit einer Variation der Prüfbedingungen für Drücke und Beanspruchungszeiten.

Dazu sind im einzelnen durchgeführt worden

- der Vergleich der – an derselben Betonmischung – aus Eindringung bzw. Durchlässigkeit ermittelten Durchlässigkeitskoeffizienten k_e bzw. k_ϕ ,
- die Prüfung der Korrelation zwischen Eindringtiefe und Eindringmenge, und zwar im Hinblick auf die Vorschrift der DIN 1045 für den Maximalwert e_{max} ,
- der Vergleich der druck- und zeitabhängigen Eindringtiefen bei verschiedenen Proben,
- der Nachweis der Vorhersagbarkeit einer nach Norm ermittelten Eindringtiefe aus den Eindringmengen bei Konstantdruck-Versuchen.

3.3.1. Vergleich der Durchlässigkeitskoeffizienten k_e und k_ϕ

Von den insgesamt 117 zur Prüfung vorgesehenen Versuchskörpern konnte bei fünf dünnen Scheiben wegen vorzeitigen Bruchs unter der Wasserbeanspruchung die Eindringtiefe nicht ermittelt werden. Eine rechnerische Abschätzung der Bruchspannungen ergab für die statisch erforderliche Plattendicke unter einem Wasserdruck von 7 bar einen Mindestwert $d \geq 4$ cm. Damit war jedoch eine meßbare stationäre Durchströmung (Durchflußmenge > Verdunstmenge) nur noch bei extrem porenreichem, also praxisfremdem Beton ($W/Z = 0,90$) zu erwarten.

Der Durchlässigkeitskoeffizient k konnte aus diesem Grund aus Eindringung (k_e) und Durchlässigkeit (k_ϕ) zugleich nur an einigen wenigen Proben ermittelt werden, wobei sich eine größenordnungsmäßige und somit relativ gute Übereinstimmung ergab, vergleiche Tabelle 5. Zumeist liegt bei den gewählten Betonmischungen bzw. Prüfkörperdicken entweder eine relativ langsame Eindringung oder eine relativ schnell einsetzende stationäre Durchlässigkeit vor, so daß ein Vergleich der beiden Koeffizienten am selben Prüfkörper nur in seltenen Fällen möglich ist.

Betonmischung	Wasser-Durchlässigkeitskoeffizienten k_e und k_ϕ				Wassergehalt %
	Versuchskörper Art/Anzahl zu k_ϕ	$10^9 k_\phi$ cm/s	Versuchskörper Art/Anzahl zu k_e	$10^9 k_e$ cm/s	
B 2	S/1	26	–	–	–
B 2	P/3	97	P/3	250	9,4
B 3	S/5	4,1	S/3	18	–
B 3	keine Durchlässigkeit		P/9	35	7,3
B 4			S/9	1,9	–
B 4			P/9	2,6	6,5
B 5			S/9	3,4	–
B 5			P/9	3,1	9,8
B 6			S/9	2,9	8,0
B 6			P/9	1,6	6,7

Tabelle 5: Durchlässigkeitskoeffizienten

Die Durchlässigkeitskoeffizienten der untersuchten Körper liegen zwischen 10^{-9} und $2,5 \cdot 10^{-7}$ cm/s und sind vermutlich infolge praxisüblicher Verdichtung maximal eine Größenordnung größer als die des reinen Zementsteins bei einem angenommenen Hydratationsgrad von 80%, vergleiche Bild 1. Es ist daher nicht möglich, den Wassereindringwiderstand am Zementstein allein zu bestimmen und aus den Ergebnissen auf den des Betons zu schließen, wie gelegentlich vorgeschlagen worden ist, da die Einflüsse von Kornabstufung und Verdichtung dabei nicht berücksichtigt werden.

Wenngleich die Anzahl der sowohl an Platten aus der Eindringung wie an Scheiben aus der Durchströmung bei ein und derselben Betonmischung gemessenen Durchlässigkeitskoeffizienten nicht groß ist, so darf doch festgestellt werden, daß die Befürchtung, bei Durchströmung würde sich wegen einer eventuellen Auslaugung ein größerer k -Wert ergeben als bei Eindringung, weil im letzten Falle eine Verstopfung der Poren eintritt, unbegründet ist.

Die mitausgewertete Wasseraufnahme variiert nur zwischen 6,5 und 9,8%, das heißt, sie beträgt näherungsweise $(8,2 \pm 1,7) \%$, was den Schluß erlaubt, daß die Eindringtiefe bei verschiedenen Betonmischungen im Mittel auf etwa $\pm 20\%$ genau erschlossen werden kann. Vergleiche hierzu Abschnitt 2, Gleichung (5): Die Konstanz des bei Druckwasserbeanspruchung sich einstellenden volumetrischen Feuchtigkeitsgehaltes, unabhängig von der jeweiligen Betonmischung, ist Voraussetzung für die Existenz eines allgemein gültigen Zusammenhangs zwischen g und e .

Tabelle 5 läßt erkennen, daß die bei Betonmischung B5 angestrebte große Durchlässigkeit ($W/Z = 0,95$) im Vergleich zur Mischung B3 nicht erreicht worden ist. Der erhebliche Unterschied zwischen den ebenfalls nahezu identisch zusammengesetzten Betonen B2 und B3 ist auf die verschiedenartige Lagerung zurückzuführen.

3.3.2. Korrelation zwischen Eindringtiefe und Eindringmenge

Eine Wasserdurchlässigkeit $e_{\max} \geq d$ zeigt sich bei 4 Platten und 14 Scheiben. Eine teils nach DIN 1045 ausreichende Wasserundurchlässigkeit, teils Eindringtiefen von mehr als 5 cm wiesen 73 Prüflinge auf. Die Gegenüberstellung von Eindringtiefe und Wasseraufnahme zeigt Bild 6. Die Ergebnisse dieser letzten Prüflinge wurden einer statistischen Auswertung unterzogen, wobei die Korrelation der Größen d_{\max} und $g_{\text{ges}} - g_{\text{p}}$ sowie e_{\max} und $A \cdot \sqrt{t}$ geprüft wurde: Für beide Größen konnte sowohl für

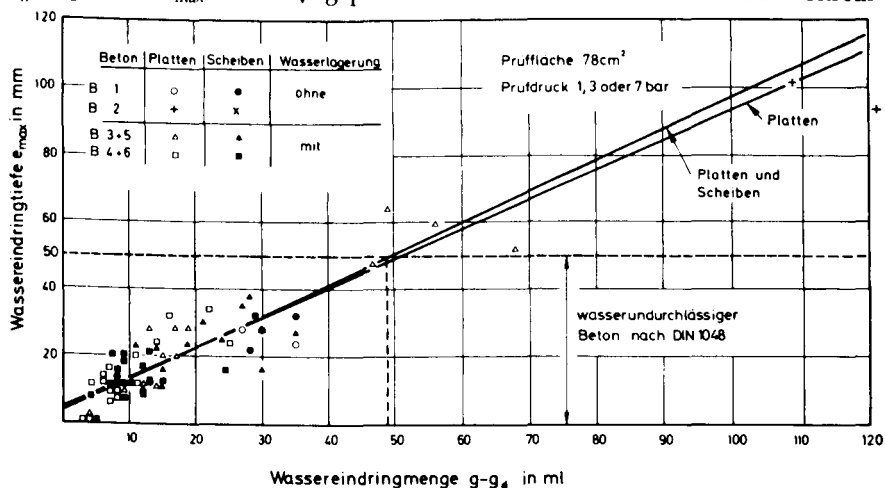


Bild 6: Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und Eindringmenge – Messungen mit Norm-Apparatur

Konstantdruck- als auch für Norm-Versuche ein straffer linearer Zusammenhang nachgewiesen werden, siehe Tabelle 6, statistische Auswertung, und Bild 7, Regressionsgerade und Vertrauensbereich. Die Streuung ist bei kleinen und großen Werten von Eindringtiefe und Eindringwert größer, was bei kleinen Eindringtiefen durch

1	2	3	Lineare Regression				Begrenzung der Eindringmenge $e_{max} \leq 50$ mm				
Art der Versuche	Art der Prüflinge	Anzahl der Prüflinge	a mm	b mm/ml	r_{ist}	$r_{< 99,9}$	Mittel kg/m ²	VB 95% kg/m ²	VB 99% kg/m ²	EW 95% kg/m ²	EW 99% kg/m ²
Konstant-Druck-Versuche	Körper Platten + Körper	36	$e_{max} = a + b(g - g_0)$								
		70	4,36	0,904	0,993	0,528	6,43	5,92	5,73	4,14	3,37
„Norm“-Versuche	Körper Platten + Körper	12	3,57	0,943	0,942	0,316	6,26	5,86	5,73	4,33	3,69
		21	0,15	1,507	0,830	0,823	4,21	3,14	2,70	1,64	0,56
Konstant-Druck-Versuche	Körper Platten + Körper	12	-1,37	1,549	0,833	0,665	4,23	3,44	3,16	2,27	1,53
		21	$e_{max} = a + b g_{lin}$								
Konstant-Druck-Versuche	Körper Platten + Körper	36	-0,61	1,605	0,937	0,528	4,02	3,69	3,54	2,44	1,95
		70	-2,41	1,654	0,907	0,316	4,02	3,71	3,51	2,61	2,11
„Norm“-Versuche	Körper Platten + Körper	12	-4,30	1,873	0,806	0,823	3,69	2,72	2,32	1,35	0,37
		21	-5,87	1,903	0,791	0,665	3,74	3,00	2,73	1,88	1,19

Tabelle 6: Statistische Auswertung

Erläuterungen:

Spalte 4: Achsenabschnitt der Regressionsgeraden; gültig für die Prüffläche von $F = 0,007854 \text{ m}^2$

Spalte 5: Regressionskoeffizient, gültig für die Prüffläche von $F = 0,007854 \text{ m}^2$

Spalte 6: Korrelationskoeffizient

Spalte 7: Beurteilungsgröße für 99,9 % Sicherheit der linearen Regression

Spalte 8: $g - g_0 = \frac{50}{b}$ bzw. $g_{lin} = A Z = \frac{50}{b}$: wahrscheinlicher Regressionswert für $e_{max} = 50$ mm

Spalte 9: Untere Vertrauensgrenze des Mittelwertes in Spalte 8 für 95 % Sicherheit und $e_{max} = 50$ mm

Spalte 10: Untere Vertrauensgrenze des Mittelwertes in Spalte 8 für 99 % Sicherheit und $e_{max} = 50$ mm

Spalte 11: Untere Vertrauensgrenze für die Vorhersage eines weiteren, von den vorliegenden

Meßwerten unabhängigen Wertes für 95 % und $e_{max} = 50$ mm

Spalte 12: wie Spalte 11, jedoch für 99 % Sicherheit.

In den Spalten 8 bis 12 ist die Eindringmenge nicht mehr in ml pro Prüffläche, sondern verallgemeinert in kg/m^2 angegeben.

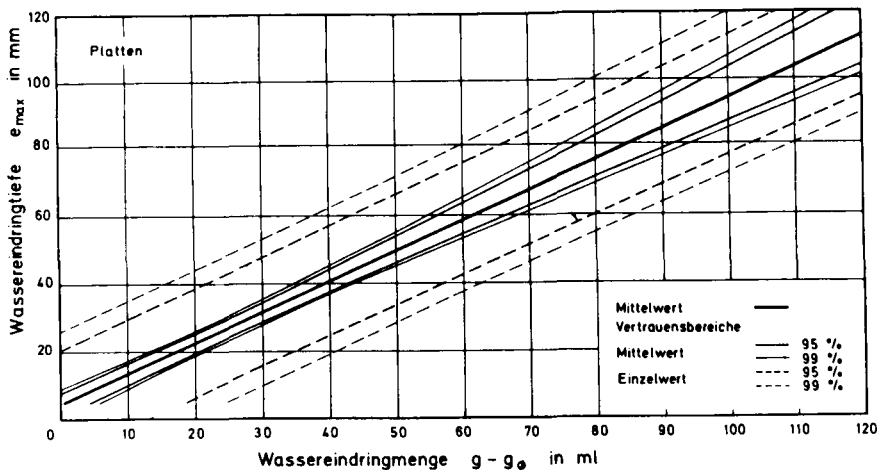


Bild 7: Regressionsgerade und Vertrauensbereiche

den Einfluß der Kapillarität und bei größeren durch den zu geringen Wertebereich zu erklären ist.

Beispielsweise ist aus Tabelle 6 zu entnehmen, daß Norm-Eindringtiefen $e_{\max} < 5$ cm erwartet werden dürfen, wenn die Wassereindringmengen

- beim Konstantdruck-Versuch im Mittel $6,26 \text{ kg/m}^2$ und Einzelwerte – mit einer Sicherheit von 99% – $3,69 \text{ kg/m}^2$
- beim Norm-Versuch im Mittel $4,23 \text{ kg/m}^2$ und Einzelwerte – wiederum mit einer Sicherheit von 99% – $1,53 \text{ kg/m}^2$

nicht überschreiten. Die Angabe entsprechender Grenzwerte für kleinere Norm-Eindringtiefen als circa 2 cm ist wegen der Versuchsstreuung mit einer angemessenen Genauigkeit nicht möglich.

In die statistische Auswertung wurden drei Prüfergebnisse nicht einbezogen, weil diese Werte erheblich von der gefundenen Linearität abweichen und im statistischen Sinne als „Ausreißer“ zu werten sind. Es handelt sich hierbei um wassergelagerte Prüfkörper großer Porosität, die bereits durch kapillare Saugvorgänge vor Versuchsbeginn so durchnäßt waren, daß bei 1 bar Druck zunächst keine zusätzliche Wassereindringung auftrat, sondern die Eindringtiefe infolge Verdunstung auf der Proben-Rückseite mit zunehmender Versuchsdauer abnahm.

3.3.3. Vergleich der druck- und zeitabhängigen Eindringtiefen bei verschiedenen Proben

Im Hinblick auf die große Streuung der Meßwerte wurde am Beispiel der vier Hauptserien B3 bis B6 untersucht, inwieweit die an verschiedenen Proben bei unterschied-

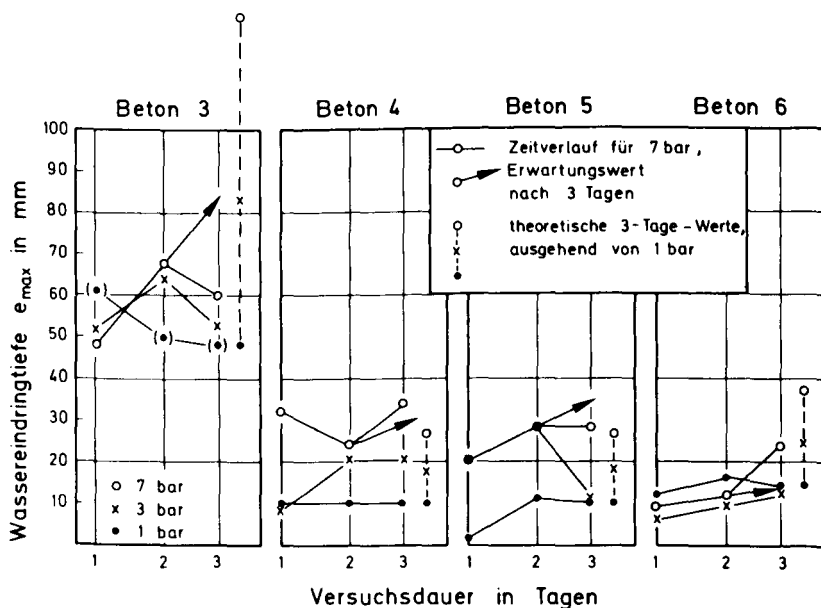


Bild 8: Vergleich der druck- und zeitabhängigen Eindringtiefen – Untersuchung an verschiedenen Proben

lichen Drücken und Beanspruchungsdauern erreichten maximalen Eindringtiefen e_{\max} mittels Gleichung (4) ineinander umgerechnet werden können, vergleiche Bild 8. Das Ergebnis ist wenig befriedigend: Die aus den Meßwerten bei 1 bar Druck und 3 Tagen Versuchsdauer errechneten Eindringtiefen für 7 bar/3-Tage-Beanspruchung, werden tatsächlich schon in rund 1 bis 2 Tagen erreicht, sofern sie überhaupt erreicht werden. Außerdem entspricht auch die Druckabhängigkeit nicht den Erwartungen, weil hierbei ebenfalls keine einsinnige Abhängigkeit erkennbar ist. Allerdings muß man bei diesen Ergebnissen bedenken, daß es sich bei jedem Versuch um andere Proben handelt. An jeder einzelnen Probe entspricht die Zeitabhängigkeit in durch- aus befriedigender Weise den theoretischen Erwartungen.

3.3.4. Vorhersagbarkeit von Norm-Eindringtiefen aus den Eindringtiefen bei Konstantdruck-Versuchen

Die bisher dargelegten Ergebnisse sind, abgesehen von der grundsätzlichen Bestätigung der theoretischen Zusammenhänge, von Bedeutung für die Frage, ob die im Norm-Versuch erzielbare Eindringtiefe auch aus Eindringmengen-Messungen im Konstantdruck-Versuch vorausgesagt werden kann. Unabhängig hiervon interessiert aber auch die Frage, inwieweit die Eindringtiefe im Norm-Versuch aus der Eindringtiefe im Konstantdruck-Versuch abgeschätzt werden kann und ob somit eine Vereinfachung des Prüfverfahrens möglich ist. Eine entsprechende Auswertung der Gleichungen (8) beziehungsweise (11) ist in Tabelle 7 zusammengefaßt. Wie man bei Vergleich der Spalten 4 und 5 einerseits und 7 und 5 andererseits erkennt, ist eine Abschätzung der Norm-Eindringtiefe wesentlich genauer aus einem 24stündigen 7-bar-Versuch als aus einem gleichlangen 1-bar-Versuch möglich. Auch hier handelt es sich um Ergebnisse, die an unterschiedlichen Prüfkörpern gewonnen wurden und damit erheblichen Streuungen unterworfen sind.

Beton- mischung	Prüfling	e_{\max} 1 bar, 24 h mm	$3,46 e_{\max}$ 1 bar, 24 h mm	$e_{\max}^{4)}$ „DIN“ mm	e_{\max} 7 bar, 24 h mm	$1,25 e_{\max}$ 7 bar, 24 h mm
1	2	3	4	5	6	7
B 3	Platte	61 ¹⁾	60,2	62	48	60,2
	Scheibe	23 ²⁾	> $d_{7\text{bar}}$	41,3	32,8	> $d_{7\text{bar}}$
B 4	Platte	1/10 ³⁾	3,46/34,6	28,0	32,0	40,1
	Scheibe	1/10 ³⁾	3,46/34,6	13,3	12,0	15,0
B 5	Platte	1/10 ³⁾	3,46/34,6	26,7	20,0	25,1
	Scheibe	8	27,7	30,7	24	30,1
B 6	Platte	12	41,5	11,3	9	11,3
	Scheibe	8	27,7	18,3	17	21,3

Tabelle 7: Abschätzung von „Norm“-Versuchswerten aus Konstantdruck-Versuchen für nur eine Druckstufe

Erläuterungen:

- 1) poröser Beton: Ergebnis durch lange Wasserlagerung verfälscht
- 2) Platte völlig durchfeuchtet, Hochrechnung auf Norm-Versuch führt deshalb auf Eindringtiefen, die größer als die für 7 bar verwendete Plattendicke sind
- 3) Die Eindringtiefe ist vom Baustoffprüfer lt. Protokoll zu 1 mm ermittelt worden; Zweifel, daß es sich hierbei um $e_{\max} = 1$ cm gehandelt hat, konnten weder bestätigt noch ausgeräumt werden.
- 4) Mittelwert aus jeweils drei durchgeführten Prüfungen

Dieses Ergebnis bedeutet aber, daß auf die Anwendung des höchsten Druckes von 7 bar nicht verzichtet werden darf, wenn mit den Norm-Prüfungen gut vergleichbare Ergebnisse erzielt werden sollen. Bei diesem Sachverhalt kann und sollte dann aber auch eine stufenweise Druckerhöhung entsprechend der Norm-Prüfung beibehalten werden; damit ist eine eventuelle Vereinfachung des Prüfverfahrens nur noch über die Prüfdauer zu erreichen.

Schließlich wurde noch geprüft, inwieweit sich die Konstantdruck-Versuche an *verschiedenen* Prüflingen bei 1, 3 und 7 bar, über jeweils 24 Stunden Prüfdauer, in Norm-Versuchsergebnisse umrechnen lassen. Das Resultat zeigt Bild 9: Es gilt trotz der in Abschnitt 3.3.3. aufgezeigten Mängel angenähert Gleichung 8:

$$e_{\text{Norm}} = \sqrt{e_1^2 + e_3^2 + e_7^2},$$

weil diese einfache Beziehung noch innerhalb des Vertrauensbereiches der Regressionsgeraden liegt.

Somit kann zusammenfassend festgestellt werden, daß es mit hinreichender Genauigkeit möglich erscheint, die Norm-Wassereindringtiefe aus der Eindringmenge – und damit zerstörungsfrei – abzuschätzen, sofern

- die gleichen Druckstufen wie im Norm-Versuch,
- möglichst die gleichen Versuchsdauern wie im Norm-Versuch,
- möglichst mehr Meßstellen beziehungsweise Prüfkörper als im Norm-Versuch

verwendet werden. Über eine Verkürzung der Prüfdauer sind im weiteren Verlauf der Untersuchungen zusätzliche Überlegungen angestellt worden, über die im folgenden mit berichtet wird.

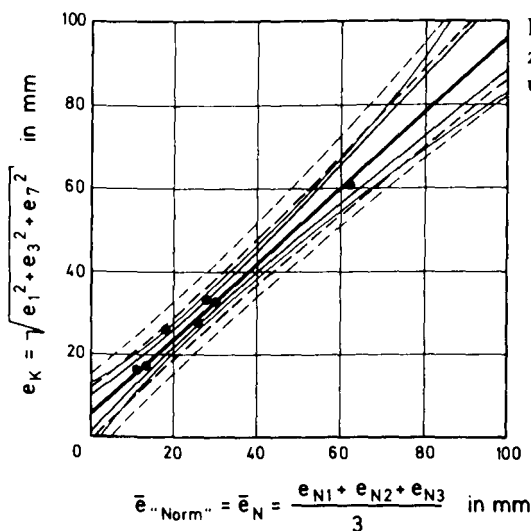


Bild 9: Zusammenhang zwischen Konstantdruck- und Normversuch.

Mittelwert	—
Vertrauensbereiche	—
Mittelwert	— 95 %
Vertrauensbereiche	— 99 %
Einzelwert	- - - 95 %
Vertrauensbereiche	- - - 99 %

4. Entwicklung und Erprobung einer transportablen Versuchsapparatur

4.1. Vorbemerkung

Um einen eindimensionalen Wassereindringvorgang etwa bis zur selben Eindringtiefe, aber zugleich mit kleinerem Prüfflächendurchmesser, wie ihn die Norm-Apparatur ($\varnothing = 10$ cm) besitzt, zu gewährleisten, wurde der Konstruktion der transportablen Versuchapparatur das Prinzip des Schutzrings zugrunde gelegt, wie es zum Beispiel vom Schutzringkondensator und von Apparaturen zur Messung der Wärmeleitfähigkeit her bekannt ist. Für den vorliegenden Fall bedeutet das die Anordnung zweier konzentrischer Druckkammern – Querschnitt kreis- beziehungsweise kreisringförmig –, die auf gleichem Druck gehalten werden, wobei aber nur der Wasserverbrauch der inneren Kammer gemessen wird. Gleichheit der Eintrittsflächen ist hierbei nicht erforderlich, jedoch ist auf gleiche Volumina beider Kammern zu achten, um bei großem Wasserverbrauch eine gleichmäßige Entleerung der Kammern zu erzielen.

4.2. Transportable Versuchsapparatur

Das Kernstück der transportablen Versuchsapparatur („T-Gerät“) ist eine Druckdose mit zylindrischer Haupt- oder Meßkammer und dazu konzentrischer Neben- oder Außenkammer, siehe Bild 10 und 11. Die Abmessungen gewährleisten einen eindimensionalen Wassereindringvorgang in Beton bis zu etwa 10 cm Tiefe; darüber hinaus erfolgt ein Übergang zu halbkugelförmiger Ausbreitung.

Beide Kammern werden von einem Vorratsbehälter mit Wasser versorgt und von Preßluftstahlflaschen mit Luftdruck beaufschlagt. Zwischen Preßluftflaschen und Hauptkammer befindet sich zur Messung der Wassereindringmenge ein Hochdruck-Wasserstandsrohr gleichen Fabrikats wie in normgemäßen Meßeinrichtungen. Durch diverse Ventile ist es möglich, den Druck einzustellen bzw. zu begrenzen und Kammern sowie Verbindungsschläuche zu entlüften, siehe Bild 12.

Da die Aufstandsflächen von Flansch und Trennwand zwischen Innen-/Außenkammer unterschiedlich groß sind und eine Unterwanderung dieser Trennwand durch Druckwasser noch vor dessen Eindringen in den Beton vermieden werden soll, ist die Innenkammer von der Außenkammer getrennt und gegen diese axial verschiebbar hergestellt. Mit einer Überwurfmutter kann die Innenkammer gegen Außenkammer und Beton verspannt werden.

Zur Anbringung am Prüfstück ist der Fuß der Außenkammer der Druckdose als ringförmiger Flansch ausgebildet, über den \perp -förmige Stahlleisten gespannt werden können. Die Befestigung erfolgt mit Gewindestangen und Messing-Spreizdübeln im Beton, wobei auf einen möglichst großen Abstand zwischen Befestigungsbohrungen und Rand der Prüffläche zu achten ist.

Zwischen Prüfgegenstand und Druckdose sind Dichtungen anzuordnen. Hierfür haben sich Zellgummiringe als geeignet erwiesen, die auf die Prüffläche mit Kau-

Bild 10: Druckmeßdosen im Einsatz:

Bild 10a: Druckmeßdose T 1: Prüfanordnung auf einem Massivzylinder – Schlauchanschlüsse zum Füllen, Entlüften und zur Druckbeanspruchung.

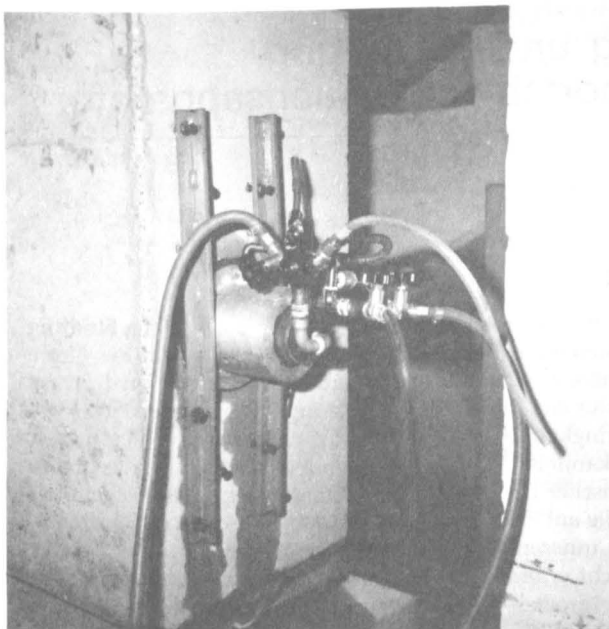
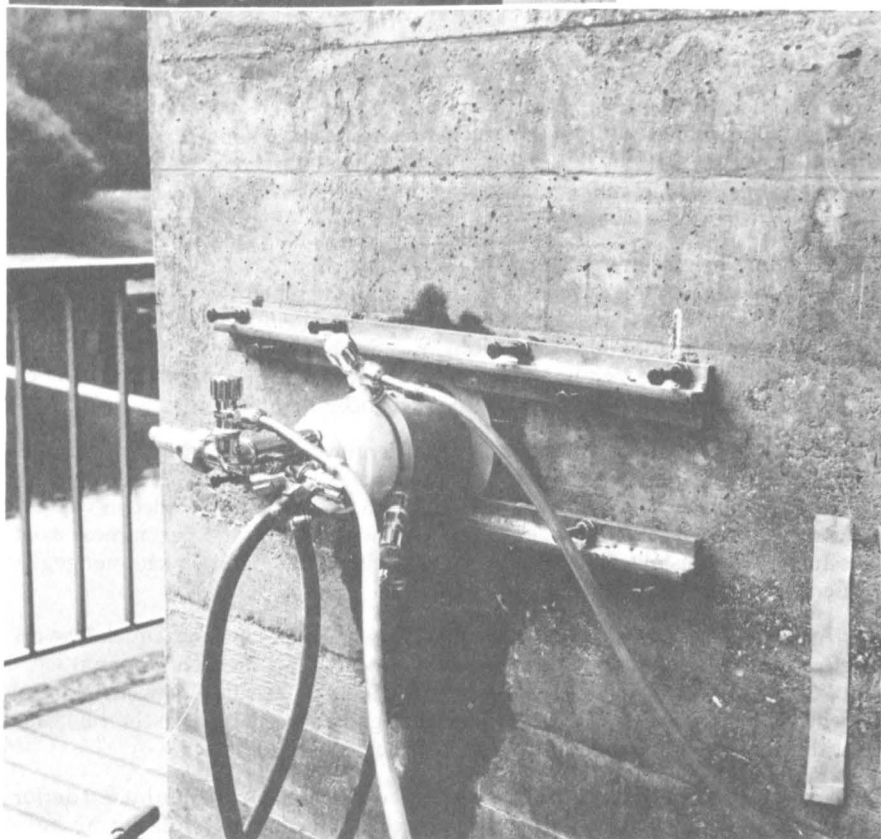


Bild 10b: Druckmeßdose T 2: Anordnung zur Prüfung von porösem Sichtbeton ohne augenscheinlichen Riß – Druckkammer unter 1 bar Druck; Wasser tritt aus Poren außerhalb der Meßstelle aus und läuft an der Wand entlang.



tschukkleber aufgeklebt werden, wodurch zugleich der Porenverschluß der Betonoberfläche bewirkt wird. Als Werkstoff für die zuerst entwickelte Druckdose (T1) war zunächst aus Gewichtsgründen Reinaluminium gewählt worden. Dieses Material hat sich jedoch nicht bewährt, da bereits nach kurzer Zeit die gewollte Verschieblichkeit der beiden Kammern gegeneinander infolge von Oxidationserscheinungen verlorengegangen war. Erst eine weiterentwickelte Druckdose (T2) aus oberflächenvergütetem Aluminium sicherte die getrennte Justierbarkeit von Innen- und Außenkammer; zugleich wurde die Anordnung der Entlüftungsöffnungen für die vertikale und horizontale Meßlage verbessert und ein induktiver Druckwandler zur automatischen Überwachung des Innenkammerdrucks eingebaut. Auch die oben genannte Klebtechnik für die Dichtungen wurde erst in langwierigen Versuchen entwickelt.

Nahezu sämtliche in Abschnitt 4.4. aufgeführten Untersuchungsergebnisse sind noch mit dem T-1-Gerät ermittelt worden.

Technische Daten

Meßkammer	Innendurchmesser	49,9 mm
Wandstärke 5 mm	Tiefe	102,8 mm
	Eintrittsfläche	19,5 cm ²
	Volumen	245 ml
Außenkammer	Innendurchmesser	87,2 mm
Wandstärke 10 mm	Tiefe	82,8 mm
	Eintrittsfläche	33,0 cm ²
	Volumen	272 ml
Vorratsbehälter, PVC		50 l
Preßluftvorrat		2 x 5 l
	200 bar reduziert auf	0,5 . . . 10 bar
Konisches Hochdruck-Wasserstandsrohr TONI		1 . . . 1000 ml
Anfangsgenauigkeit		0,5 ml
Endgenauigkeit		10 ml
Gewicht der Gesamtapparatur		ca. 35 kg

4.3. Versuchsdurchführung

Die Aufgabenstellung des zweiten Versuchsabschnitts war auf die Entwicklung und Erprobung der transportablen Versuchseinrichtung im Labor gerichtet. Daher wurden außer den bisher untersuchten Prüfplatten und -scheiben – vergleiche Abschnitt 3.1. – auch massive, ca. 90x70x46 cm große Betonblöcke und daraus entnommene Zylinder mit 15 cm Durchmesser und 12 cm Höhe (= Prüfplattendicke) in die Messungen einbezogen, siehe Bild 13.

Die Betonzusammensetzung der gewählten Mischungen wurde nicht verändert, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Leider gelang dieses Vorhaben nur unvollständig, weil für die 625 kg schweren Massivblöcke eine einfache Unterwasserlagerung nicht möglich war und demgemäß auch für die zugehörigen Versuchskörper nicht sinnvoll erschien. Die Versuchskörper sind jedoch vor Beginn der

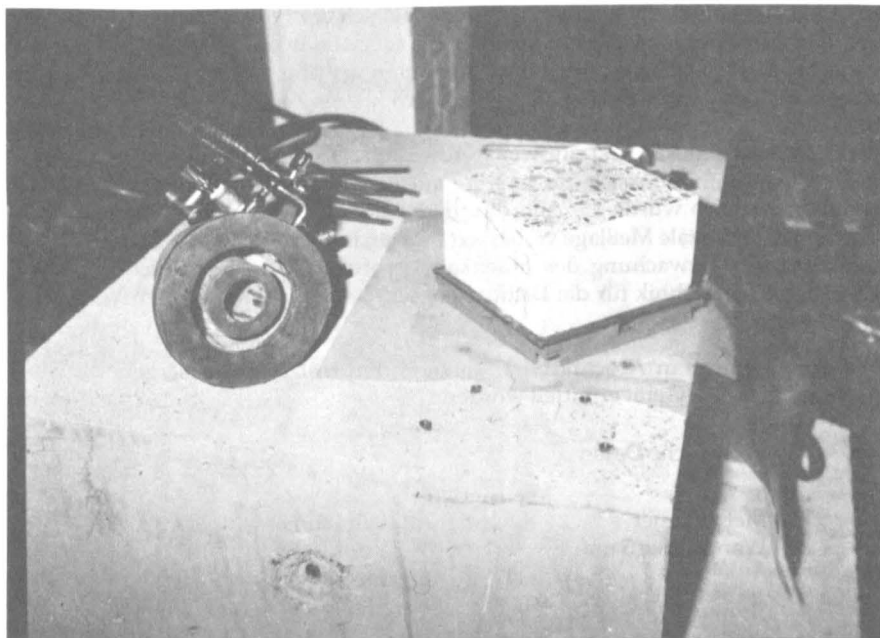


Bild 11: Ansicht der Druckkammer von unten – bei der Ausführung T 1 ist die Dichtung Bestandteil der Druckkammer, bei der zweiten Ausführung T 2 wird die Dichtung auf die Prüfzelle geklebt

Druckbeanspruchung für die Dauer einer Druckstufe von der Meßapparatur aus gewässert worden, wobei wegen des Höhenunterschieds von Oberfläche und Wassersäule ein Wasserdruck von $600 \text{ mmWS} = 0,06 \text{ bar}$ herrschte.

Insgesamt sind in diesem Untersuchungsabschnitt 66 Prüfungen durchgeführt worden, von denen einige nicht erfolgreich abgeschlossen werden konnten, weil bei Druckerhöhung entweder die Prüfscheiben brachen oder an einzelnen Versuchskörpern so große Undichtigkeiten auftraten, daß die Untersuchungen infolge mangelnden Wassernachschubs abgebrochen werden mußten. In diesen Fällen sind zum Teil Wiederholungsmessungen durchgeführt worden.

Die Prüfdauer ist im Hinblick auf die geplanten Messungen an Schutzbauwerken auf 4 Stunden je Druckstufe begrenzt worden. Wegen des linearen Zusammenhangs zwischen g und \sqrt{t} ist eine Abkürzung der Versuchsdauer an einem bestimmten Versuchskörper unproblematisch. In diesem Abschnitt ging es jedoch darum, zu untersuchen, ob beziehungsweise innerhalb welcher Grenzen bei Kurzzeitmessungen an verschiedenen Versuchskörpern ein Rückschluß auf die an wiederum unterschiedlichen Versuchskörpern im Langzeit-Versuch ermittelten Werte möglich ist.

In Tabelle 8 sind die geprüften Versuchskörper zusammengestellt, an denen vorzugsweise zum Nachweis der Eignung der transportablen Meßeinrichtung folgende Untersuchungen durchgeführt worden sind:

Norm-Versuch nach DIN 1048 an Platten im Norm-Prüfstand zur Beurteilung der Wasserundurchlässigkeit gemäß DIN 1045 und zur Prüfung der Übereinstimmung mit den Betonen B3 bis B6,

Kurzzeitversuch an Platten im Norm-Prüfstand zur Klärung der Frage, inwieweit eine Abkürzung der Untersuchungsdauer grundsätzlich möglich ist; inhaltlich Nachtrag zu Abschnitt 3,

Prüfung der Übereinstimmung von Kurzzeitversuchen an Platten und Zylindern im Norm-Prüfstand,

Prüfung der Übereinstimmung von Kurzzeitversuchen an Platten in Norm-Prüfstand und mit transportabler Prüfeinrichtung,

Kurzzeitversuch an Blöcken mit transportabler Meßeinrichtung bei vertikaler und horizontaler Anbringung der Druckdose zur Bestimmung der Eindringung anhand der ermittelten Zusammenhänge zwischen Eindringmenge und Eindringtiefe

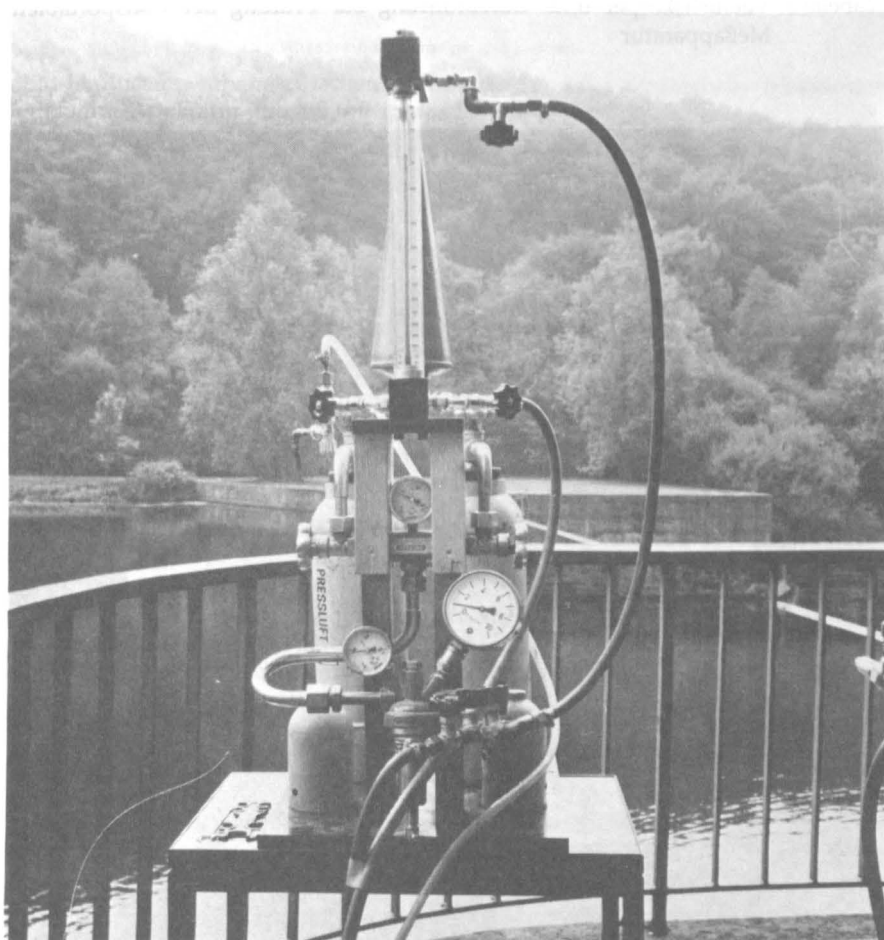


Bild 12: Ansicht der Meßapparatur – ohne Wasservorratsbehälter – Meßapparatur unter 1 bar Druck bei 35 ml Wassereindringmenge

Versuchskörper	Versuchsdauer je Druckstufe Stunden	Betonmischung 7: W/Z=0,95		Betonmischung 8: W/Z=0,65	
		Norm-Prüf- einrichtung	Transportable Prüf- einrichtung	Norm-Prüf- einrichtung	Transportable Prüf- einrichtung
Platten (P)	4	3	3	3	3
	24, 48	3	–	3	–
Scheiben (S)	4	3	–	3	3
Blöcke (M)	4	–	8	–	7
Zylinder (Z)	4	6	3	12	3

Tabelle 8: Versuchskörper und -durchführung zur Prüfung der transportablen Meßapparatur

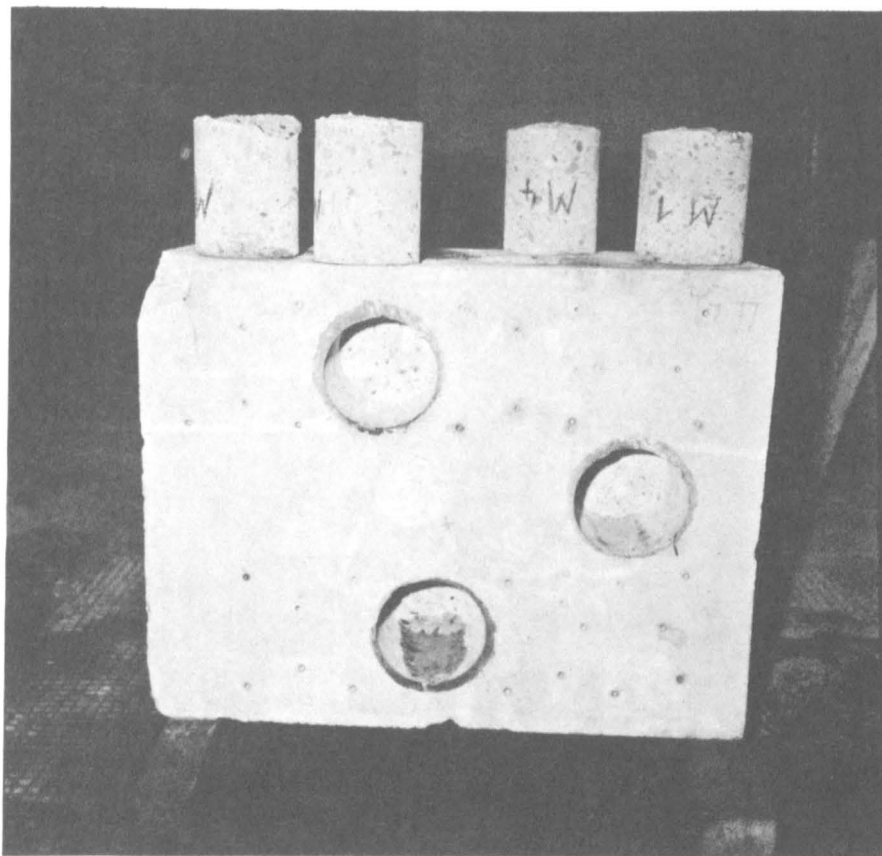


Bild 13: Massivblock mit Bohrkernen

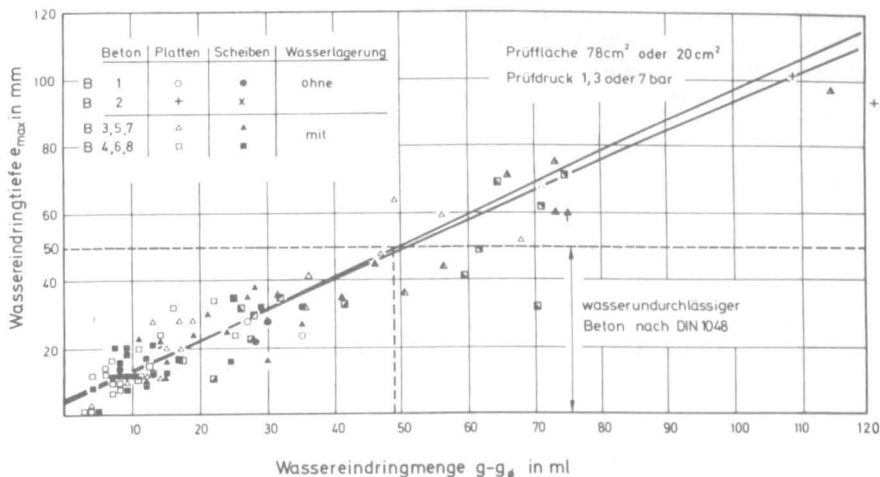


Bild 14: Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und Eindringmenge – Messungen mit Norm-Apparatur und mit transportabler Apparatur T 1

4.4. Untersuchungsergebnisse

4.4.1. Übereinstimmung mit den Untersuchungen im Norm-Prüfstand unter Norm-Bedingungen hinsichtlich Eindringtiefe und Eindringmenge

In Bild 14 sind zusätzlich zu den Ergebnissen der Konstantdruck-Versuche, vergleiche Bild 6, die maximalen Wassereindringwerte e_{\max} in Abhängigkeit von der Wassereindringmenge $g_{\text{ges}} - g_{\Phi}$ des zweiten Versuchsabschnitts eingezeichnet.

Im wesentlichen fügen sich die neuen Meßpunkte gut in die bereits bekannte Abhängigkeit $e_{\max}(g - g_{\Phi})$ ein, und zwar unabhängig von Prüfverfahren und -apparatur, Versuchsdauer und Körperform, bis auf einen einzigen Ausreißer aus dem 95%-Vertrauensbereich der Einzelwerte.

Eine neue Regressionsgerade für den Zusammenhang zwischen Wassereindringtiefe und -menge würde dennoch gegenüber den alten Geraden für Konstantdruck-Versuche einerseits und Norm-Versuche andererseits eine etwas geringere Steigung aufweisen. Jedoch wird insgesamt eine neue statistische Auswertung nicht für sinnvoll gehalten, solange im Bereich $e_{\max} = 40 \dots 60$ mm, beziehungsweise $80 \dots 100$ mm die Anzahl der Meßwerte nicht hinreichend dicht ist.

4.4.2. Vergleich der Betonmischungen B3 bis B6 mit B7 und B8, Umrechnung von Kurzzeitversuchen auf Norm-Versuche sowie Erwartungswerte für die Eindringtiefe

Für diesen Vergleich der Betonmischungen und ihrer Eindringtiefen sowie -mengen bei verschiedenen Beanspruchungsdauern eignen sich zur Prüfung auf dem Norm-Prüfstand am ehesten 12 cm dicke Prüfplatten. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Die Mittelwerte der Eindringtiefe (Spalte 6) zeigen ebenso wie die Mittelwerte der Eindringmengen (Spalte 11), daß es sowohl bei der wasserärmeren Betonrezeptur wie auch bei der mit einem W/Z-Wert von 0,95 nicht gelungen ist, über jeweils drei Mischungen ein vergleichbares Wassereindringverhalten zu erzielen, trotz außer-

ordentlich geringer Unterschiede in den Mischungsbestandteilen. In geringerem Maße sind diese Unterschiede auch in den Druckfestigkeiten zu erkennen, wie folgende Gegenüberstellung zeigt. Offenbar müssen die erheblichen Differenzen im Wassereindringverhalten auf eine unterschiedliche Lagerung zurückgeführt werden.

Wasser-Zement-Wert	0,65			0,95		
Betonmischung	B 6	B 4	B 8	B 5	B 3	B 7
e_{\max} in mm	11,7	28,0	32,3	29,0	62,0	71,0
$\beta_{w,s}$ in N/mm ²	47,8	44,1	37,6	26,7	23,4	23,3

Wie ersichtlich, ergibt die Hochrechnung von 4-Stunden-Prüfungen auf Norm-Prüfungen zu große Werte für Eindringtiefe und -menge, die bei

Betonmischung 7 (große Eindringtiefe) ca. 31%
 Betonmischung 8 (normale Eindringtiefe) ca. 16%

Betonmischung	Versuchsdauer je Druckstufe in Stunden	Wassereindringtiefe in mm					Wassereindringmenge in ml			
		Probe			Mittel	3) Erwartungswert	Probe			Mittel
		1	2	3	6		1	2	3	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B 4	24	28	32	24	28,0	16,7	12	12	9	11,0
B 6	24	12	12	10	11,7	35,9	27	20	24	23,7
B 8	Norm ³⁾	32	35	30	32,3	43,4	26	32	28	28,7
B 8	4	17	15	12	14,7	20,9	17,5	12,5	11,5	13,8
B 8	4→Norm	43,5	38,4	30,7	37,5	53,5	44,8	32,0	29,4	35,4
B 3	24	60	42	84	62,0	84,1	69	44	54	55,7
B 5	24	44	26	17	29,0	34,4	36	12	20	22,7
B 7	Norm ³⁾	72	71	70	71,0	-	147	158	137	1)
B 7	4	36	32	41	36,3	52,9	31,5	36,0	37,5	35,0
B 7	4→Norm	92,2	81,9	105,0	93,0	135,2	80,6	92,2	96,0	89,6

Tabelle 9

- 1) Vor Versuchsbeginn nicht gewässert, deshalb Werte zu groß; Vergleich nicht möglich
- 2) Bei Umrechnung der 4-Stunden-Werte in Norm-Werte sind die 4-Stunden-Werte mit dem Faktor 2,56 zu multiplizieren, vergleiche Gleichung (12).
- 3) Aus dem Mittelwert der Wassereindringmenge nach Tabelle 6 für Norm-Versuche an Körpern gemäß $e_{\max} = 0,15 + 1,507 \cdot g$ abgeschätzter Erwartungswert der Eindringtiefe.
- 4) Die Eindringtiefe im Norm-Versuch nach DIN 1048 ist theoretisch um 4,4% größer als bei einer Beanspruchung mit den gleichen Drücken, aber je Druckstufe gleichmäßig jeweils 24 Stunden dauernd.

über den tatsächlich ermittelten Werten liegen. Somit betragen im Mittel für beide Betonmischungen die tatsächlichen Norm-Eindringtiefen etwa 80% der aus 4-Stunden-Prüfungen abgeschätzten Werte. Die Differenz der Eindringmenge beträgt bei Beton B8 etwa 23%.

Obwohl diese Abweichungen bei wasserdurchlässigem Beton im Sinne von DIN 1045 recht groß sind, liegen sie doch auf der sicheren Seite, so daß unabsichtlich keine Fehleinschätzung in Richtung zu guter Eigenschaften zu erwarten ist.

Nicht ganz so klar liegen die Verhältnisse bei den aus den Eindringmengen ermittelten Erwartungswerten für die Eindringtiefe (Spalte 7): Bei dem relativ dichten Beton würde man aus allen gemessenen Ergebnissen zwar nicht die richtige Eindringtiefe, aber die richtige Einstufung abschätzen können; lediglich der im Kurzzeitversuch geprüfte Beton B8 würde mit $e_r = 53,5$ mm gerade als wasserdurchlässig angesehen, obwohl die wirkliche mittlere Eindringtiefe nur 32,3 mm beträgt. Vergleichbare Werte ergaben sich auch für die Betonmischung B7 im Kurzzeitversuch, wenngleich sich hier nach der Abschätzung der Erwartungswerte für die Norm-Versuchsdauer keine Fehleinschätzung ergeben würde. Die Mischungen B3 und B5 werden anhand der gemessenen Wassermengen richtig eingeschätzt.

In diesen Vergleich sind die Betonscheiben nicht mit einbezogen worden, da wegen teilweisen Bruchs beziehungsweise Durchlässigkeit noch weniger Werte als bei den Platten zur Verfügung standen.

4.4.3. Übereinstimmung der Eindringtiefen für Norm- und Transportapparatur von Platten und Zylindern

Um an Massivblöcken die Eindringtiefe direkt messen zu können, ist es erforderlich, Proben zu entnehmen und diese im Norm-Prüfstand zu untersuchen. Derartige Proben lassen sich am einfachsten als Bohrkerne (Zylinder) gewinnen, wobei man deren Länge der üblicher Prüfkörper angleicht, das heißt zu $d = 12$ cm wählt.

Ein Vergleich der Meßwerte, siehe Tabelle 10, zeigt die zunächst erstaunliche Tatsache, daß trotz identischer Betonmischungen die Eindringtiefe in Zylinder ganz erheblich größer ist als in Platten, und zwar etwa um den Faktor 3 bis 5.

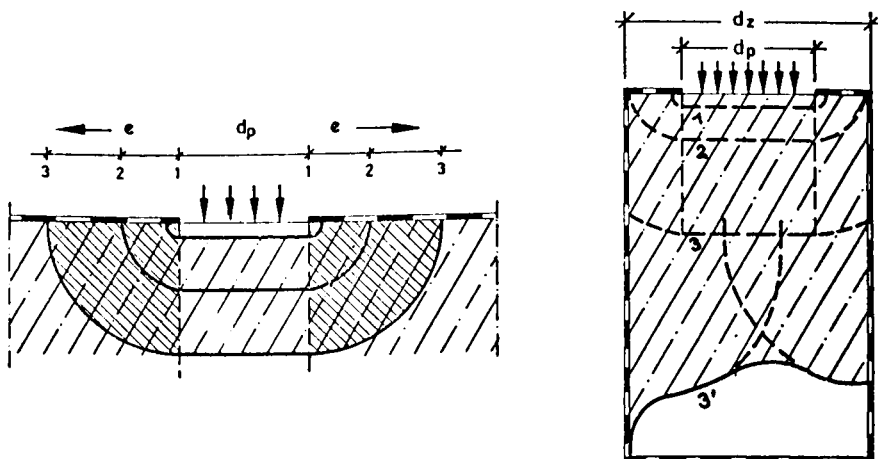
Als Erklärung scheinen sich zunächst Verdichtungsmängel bei den Massivblöcken anzubieten. Dem widerspricht aber, daß mit der Transportapparatur diese Differenz nur noch rund 70% beträgt.

Die Ursache dieser Abweichung erklärt sich aus den Abmessungen von Prüffläche und Prüfkörper unter Berücksichtigung der Eindringtiefe: Der Ausbreitungsvorgang erfolgt grundsätzlich nicht nur senkrecht zur Eintrittsfläche, mit einem zylindrischen Durchfeuchtungsprofil, sondern mit wachsender Eindringtiefe zunehmend halbkugelförmig, wobei der wulstförmige Randbereich des Durchfeuchtungsvolumens anfänglich, das heißt bei einem Verhältnis Eindringtiefe/Durchmesser der Eintrittsfläche $\ll 1$, gering ist, mit zunehmender Eindringung aber absolut und relativ größer wird, vergleiche Skizze. Wenngleich das Fortschreiten der Wasserfront in den Prüfkörper hinein hierdurch nicht verfälscht wird, so ergeben sich doch bei der aufgenommenen Wassermenge – in Abhängigkeit von Eindringtiefe und Prüfflächenradius – schnell erhebliche Abweichungen von dem zur gleichen Tiefe gehörenden Erwartungswert:

$$\frac{\Delta g}{g} = \pi \frac{e}{d}$$

bei $d = 5$ cm und $e = \frac{5}{4} = 1,5$ cm beträgt der Fehler in der Eindringmenge bereits 100 %

Sind die Ausbreitungsmöglichkeiten parallel zur Eintrittsfläche begrenzt, wie bei zylindrischen Körpern mit nur wenig größerem Durchmesser als dem der Prüf- fläche, kommt es zu einer Widerstandsverminderung in der Randzone beziehungsweise einer relativen Druckerhöhung auf dem abgedichteten Zylindermantel, wodurch die Eindringung – ausgehend vom Randbereich – gefördert wird; insgesamt wird sich eine Eindringfront $3'$ statt 3 einstellen vergleiche Skizze.



Während bei der Norm-Apparatur – mit 10 cm Durchmesser der Eintrittsfläche – und Bohrkernen von 15 cm Durchmesser offensichtlich diese Gefahr teilweise bereits ab einer Eindringtiefe > 25 mm besteht und bei $e \approx 50$ mm eine deutliche Verfälschung vorhanden ist, kann mit dem T-Gerät anhand der Eindringmengenmessung bis 32 mm beziehungsweise 65 mm Eindringtiefe noch mit brauchbaren Ergebnissen gerechnet werden.

Durch diesen Effekt sind leider die Versuchswerte der Norm-Apparatur an zylindrischen Prüfkörpern für weiterführende Aussagen nicht verwendbar.

Für die Eindringtiefe bei Ermittlung mit der Norm- bzw. der Transportapparatur kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, siehe Tabelle 10: Die Abweichungen betragen bei B7 rund 10%, bei B8 zwar 50%, jedoch ist hier zu bedenken, daß es kaum einen qualitativen Unterschied bedeutet, ob bei geringer Eindringung die Tiefe 15 oder 22 mm beträgt. Die Eignung der transportablen Apparatur zur Bestimmung der Eindringtiefe größerflächiger Schutzraumoberflächen – allerdings verbunden mit dem Mangel einer lokalen Zerstörung der Oberflächen (Bohrkern-Entnahme) – kann als ausreichend gesichert angesehen werden.

Die der Tabelle 10 entsprechenden Werte für die Wassereindringmenge sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Berechnet man hieraus das Verhältnis der unter Verwendung einer Norm-Apparatur ermittelten Eindringtiefe zu der mit der T-Apparatur gemessenen Eindringmenge – Durchführung der Prüfung jedoch als Kurzzeitversuch – so ergibt sich ein Wert von $\approx 0,65$ mm/ml. Bei Anwendung der Hochrechnungen nach Tabelle 11 kann daher die Norm-Eindringtiefe aus der Wasser-

eindringmenge eines 4-Stunden-Versuchs mit der transportablen Apparatur geschätzt werden zu

$$e_{\text{Norm}} = 0,8 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{11}} e_{\text{kurz}} = 0,8 \cdot 0,65 \sqrt[4]{\frac{1}{11}} \cdot g_{\text{kurz}} \approx 1,33 \frac{g_{\text{kurz}}}{T}$$

hierbei steht der Zweitindex für die Art der verwendeten Prüfeinrichtung.

Betonmischung	Meßapparatur	Wassereindringtiefe in mm								Bemerkungen
		Platten				Zylinder				
		1	2	3	Mittel	1	2	3	Mittel	
B 7	N	36	32	41	36,3	110	102	97	103,0	
B 8	N	17	15	12	14,7	68	60	78	68,7	1) 1)
		-	-	-	-	69	41	32	47,3	
		-	-	-	-	48	71	62	60,3	
B 7	T	36	44	(120)	40,0	75	71	60	68,7	
B 8	T	23	11	33	22,3	37	38	-	37,5	

Tabelle 10: Übereinstimmung der Eindringtiefen für Norm- und Transportapparat von Platten und Zylindern

1) Diese Werte beziehen sich auf zusätzlich vertikal (parallel) und horizontal (senkrecht zur Betonierichtung) entnommenen Bohrkerne; die Prüfung erfolgte jedoch vertikal.

Betonmischung	Meßapparatur	Wassereindringmenge in ml							
		Platten				Zylinder			
		1	2	3	Mittel	1	2	3	Mittel
B 7	N	31,5	36,0	37,5	35,0	186,0	135,5	119,5	147,0
B 8	N	17,5	12,5	11,5	13,8	116,6	105,9	113,6	111,8
						64,3	59,5	70,5	64,8
						63,5	74,7	72,0	70,1
B 7	T	50,0	56,5	(150)	53,3	73,7	67,4	73,4	71,5
B 8	T	27,5	22,0	41,5	30,3	67,1	37,2	-	52,2

Tabelle 11: Übereinstimmung der Eindringmengen für Norm- und Transportapparat von Platten und Zylindern

4.4.4. Rückschluß auf die Eindringtiefe in Massivblöcken

Unter Verwendung der bisher ermittelten Zwischenergebnisse läßt sich aus den gemessenen und den linearisierten Wassereindringmengen in die Massivblöcke der in Tabelle 12 angegebene Rückschluß auf die Wassereindringtiefe ziehen:

Betonmischung	Meßgröße/ Schätzwert	Wassereindringmengen g_{ges} , g^* , g_{lin} in ml gemessene Wassereindringtiefe e_{max} in mm geschätzte Wassereindringtiefe e_r in mm				Versuchskörper/ Meßrichtung
		1	2	3	Mittel ¹⁾	
B 7	g_{ges}	73,0	71,5	(891)	72,3	P/v
	g^*	50,5	56,5	150	53,5	
	g_{lin}	–	65,5	–	65,5	
	e_{max}	36	44	120	40,0	
	e_r	–	–	–	34,8 ... 42,6	
B 7	g_{ges}	46,5	39,0	53,0	46,2	M/v
	g^*	46,5	39,0	51,0	45,5	
	g_{lin}	42,0	34,1	58,4	44,8	
	e_r	–	–	–	29,1 ... 30,0	
B 7	g_{ges}	210	124,5	113	149,2	M/h
	g^*	191	102	97	130,0	
	g_{lin}	271,5	127,8	118,3	172,5	
	e_r	–	–	–	84,5 ... 112,1	
B 8	g_{ges}	31,0	61,5	53,5	48,7	P/v
	g^*	27,5	22	41,5	30,3	
	g_{lin}	26,3	31,6	32,5	30,1	
	e_{max}	23	11	33	22,3	
	e_r	–	–	–	19,6 ... 31,7	
B 8	g_{ges}	74,0	50,3	62,0	62,1	M/v
	g^*	50,3	25,5	55,3	43,7	
	g_{lin}	44,1	18,7	48,8	37,2	
	e_r	–	–	–	24,2 ... 40,4	
B 8	g_{ges}	88,0	69,0	65,0	74,0	M/h
	g^*	81,0	57,0	46,7	61,6	
	g_{lin}	83,9	47,5	40,2	57,2	
	e_r	–	–	–	37,2 ... 48,1	

¹⁾Mittelwert aus den sinnvoll erscheinenden Werten.

Tabelle 12: Rückschluß auf Eindringtiefe in Massivblöcken aus Messungen an Platten

$$e_r = 0,65 g_{\text{kurz}} \text{ in mm/ml}$$

Die Messungen erfolgten hierbei ausnahmslos mit der transportablen Meßapparatur.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei Prüfungen in vertikaler Lage ergab sich für beide Betonmischungen eine gute Übereinstimmung zwischen mittlerem Meß- und Schätzwert für die Eindringtiefe.

Die Abweichungen zwischen g' und g_{in} sind in Anbetracht der statistischen Unsicherheit dieser Größen gering, so daß die Verwendung einer dieser beiden Linearisierungsgrößen ausreicht.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß mit der transportablen Apparatur – im Rahmen der allgemeinen Voraussetzungen – trotz verändertem räumlichem Ausbreitungsverhalten auch an Massivblöcken aus der Wassereindringmenge ein Rückschluß auf die Eindringtiefe gezogen werden kann. Dabei ist naturgemäß eine Vorhersage, in welcher der beiden nach DIN 1048 festgelegten Klassen – „wasserundurchlässig“ $e_{\text{max}} \leq 5 \text{ cm}$ beziehungsweise „durchlässig“ $e_{\text{max}} \geq 5 \text{ cm}$ – ein zu prüfender Beton liegt, mit erheblich größerer Sicherheit möglich als eine Schätzung der absoluten Größe der Eindringtiefe.

5. Bestimmung der Wasserdichtigkeit älterer Schutzbauten

5.1. Auswahl der Bauten

Die Anwendung der transportablen Apparatur sollte vorwiegend an Schutzbauten aus den Jahren 1939/44 erfolgen und hierbei wiederum insbesondere an solchen, bei denen nach Augenschein erhebliche Bedenken im Hinblick auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons bestanden. Die zu überprüfenden Schutzbauwerke waren aus Kostengründen möglichst in der Nähe von Braunschweig zu suchen, wobei allerdings ein bekanntermaßen schadhafte Bauwerk, die für den Schutzgrad S 3 ausgelegte Pumpstation der Dortmunder Wasserwerke in Schwerte-Villigst, mit in die Untersuchungen einbezogen werden sollte. Auch an die Prüfung von Schutzbauten, in denen Warnämter untergebracht sind, sowie an solche, die sich im Bereich der Erprobungsstelle Meppen befinden, war wegen ihrer Bedeutung beziehungsweise wegen ihrer vielfachen dynamischen Belastung gedacht worden, jedoch erwies sich die Verwirklichung derartiger Prüfungen als schwierig oder auch als nicht erforderlich.

Insgesamt wurden mit Unterstützung des Bundesvermögensamtes und des Zivilschutzamtes (A 38) der Stadt Braunschweig die in Tabelle 13 aufgeführten Schutzbauten lfd. Nr. 1 bis 21 in Augenschein genommen und zunächst die Wasserdurchlässigkeit anhand der Oberflächenbeschaffenheit der Außenwände auf Grund der bisher gewonnenen Erfahrungen beurteilt. Bauunterlagen waren für diese Schutzbauten nicht mehr zu beschaffen.

Für eine Prüfung wurde schließlich der Hochbunker „Borsigstraße“ in Braunschweig ausgewählt, weil er ein besonders ungleichmäßiges Betongefüge besitzt, Risse durch Schwinden und Beschuß beziehungsweise Bombardement aufweist, derzeit leersteht und die hygienischen Verhältnisse im Innern auch einen längeren Aufenthalt zum Zwecke der Durchführung der Messungen gestatteten.

Die Messungen zeigten, daß der Beton des hinsichtlich seines Erhaltungszustandes als typisch eingestuften Schutzbaues trotz gegenteiligen Augenscheins als wasserundurchlässig anzusehen ist, wenngleich der Schätzwert der Wassereindringtiefe mehr als 50 mm beträgt. Deshalb wurde als zweites Bauwerk die oben genannte geschützte Pumpstation in Villigst ausgewählt, deren Beton – wie durch eine frühere Begutachtung in anderem Zusammenhang bekannt war – noch mangelhafter ist als der aus den vierziger Jahren stammender Schutzbauten.

Hierbei ergaben sich, abgesehen von wenigen Bereichen mit gefügedichtem Beton, bei porösen Oberflächen rechnerisch und nachgeprüft wiederum Eindringtiefen ≥ 60 mm. Allerdings konnte mit dem in der Apparatur zur Verfügung stehenden Wasservorrat nicht die angestrebte stationäre Durchfeuchtung der 2,50 m dicken Wände erzielt werden, sondern nur ein Rückfluß auf die Druckseite, vergleiche Bild 17. Bestätigt werden konnte aber die erhebliche Bedeutung der Risse für die Wasserundurchlässigkeit: Die auch in – bezüglich der Korrosion unschädliche – Risse mit Rißbreiten $\leq 0,1$ mm eindringenden Wassermengen sind vielfach größer

Lfd. Nr.	Standort	Art	Baujahr	Ungef. Anzahl d. Schutzplätze	Verwalter	Gegenwärtiger Zustand	Beurteilung
1	BS, Borsigstraße	Hochbunker, zweigeschossig	1941	800	A 38	ungenutzt: nicht entfestigt, zahlreiche Risse, poröses Betongefüge	wasserdicht, nicht gasdicht
2	BS, Glogauststraße	Hochbunker, zweigeschossig	1942	950	BVA	ungenutzt: nicht entfestigt, von außen guter Zustand	wasserdicht, vermutlich gasdicht
3	BS, Madamenweg	Hochbunker, dreigeschossig	1942	1500	BVA	ungenutzt: nicht entfestigt, sehr poröses Gefüge, zahlreiche Risse	undicht, Bohrungen durch die Seitenwände
4	BS, Celler Str.	Tiefbunker, eingeschossig	1940/1974	165	A 38	wieder hergestellt, neu eingerichtet	i.a. guter Zustand, jedoch nicht vollständig wasserdicht
5	BS, Alte Waage	Tiefbunker, eingeschossig	1942/1974	360	A 38	wiederhergestellt, neu eingerichtet	dicht, guter Zustand innen und außen
6	BS, Kralenriede	Hochbunker, dreigeschossig	1941/1942	500	BVA	ungenutzt, nicht entfestigt, zahlreiche Risse	wasserdicht, nicht gasdicht
7	SZ-Heerte	Hochbunker, dreigeschossig	1944/1945	1500	A 38	Nutzung unklar: nicht entfestigt, Risse in Außenwänden	vermutlich wasserdicht, kaum gasdicht, Kriegsschäden
8	SZ-Watenstedt	Hochbunker mit Flakturm	1941	600	A 38	Nutzung unklar entfestigt, tlw. verklünnert	spezielle Beurteilung nicht möglich
9	SZ-Lebenstedt	Hochbunker, mehrgeschossig	1943/1944	1600	BVA	ungenutzt, nicht entfestigt	teilweise undicht
10	SZ-Hallendorf	Hochbunker, mehrgeschossig: Hauptteil als Turm, Seitenteil zweigeschossig	1943/1944	1600	BVA	ungenutzt: nicht entfestigt	teilweise undicht
11	SZ-Hallendorf	Erdbunker	1942/1943	100		ungenutzt: nicht entfestigt	nur teilweise über OK Gelände
12	SZ-Fa. Frey KG	Hochbunker, eingeschossig	1942/1943	300	Fa. Frey KG	ungenutzt: nicht entfestigt	wasserdicht, vermutlich gasdicht
13	BS, Wilhelmstraße	Hochbunker, dreigeschossig	1942/1943	1200	A 38	Unterkunft für den THW-Ortsverband, entfestigt	entfällt
14a	BS, Celler Str. Krankenhaus	Hochbunker, mehrgeschossig	1942/1943	1000	BVA	Nutzung unklar: nicht entfestigt	teilweise undicht
14b	BS, Celler Str. Krankenhaus	Hochbunker, eingeschossig	1942/1943	165	BVA	Nutzung unklar: nicht entfestigt	teilweise undicht
15	BS, Hamburger Str.	Tief u. Hochbunker, zweigeschossig	1944	440	Schmalbach-Lubeca	Nutzung unklar: nicht entfestigt, breite Risse, Kiesnester	vermutlich noch wasserdicht, nicht gasdicht
16	BS, Nußberg	Erdbunker	1941/1942	600	BVA	gesprengt	entfällt
17	BS, Münzstraße	Hochbunker, mehrgeschossig	1942/1943	1000/1200	Stadt BS	Verwaltung: entfestigt	vermutlich wasserdicht
18	BS, Klint	Hochbunker, zweigeschossig	1944	500	BVA	gesprengt	entfällt
19	BS, Alte Knochenhauerstraße	Hoch-Tiefbunker, viergeschossig	1942/1943	800	BVA	ungenutzt: nicht entfestigt	wasserdicht
20	BS, Kaiserstraße	Hochbunker, dreigeschossig	1942/1943	650	BVA	ungenutzt: nicht entfestigt	wasserdicht, vermutlich auch gasdicht
21	BS, Holwedestraße Krankenhaus	Hochbunker, zweigeschossig	1942	1000	BVA	Nutzung unklar: teilentfestigt	wasserdicht
22	Schwerte-Villigst	Wassergewinnungsanlage und Pumpstation, Schutzgrad S 3	1959	≤ 30	Dortmunder Stadwerke	zahlreiche Schwindrisse, innen abgedichtet	von außen: nicht gas- und wasserdicht, von innen: unklar
23	H, Kröpcke	Tiefgarage, zweigeschossig	1974/1975	1500	Boden-Union	zahlreiche nachträglich verschlossene Schwindrisse	wasserdicht, mit unverschlossenen Schwindrissen: nicht gasdicht

Tabelle 13: Zusammenstellung der besichtigten Schutzbauwerke

als die Wasseraufnahme des Betons. Die Bedeutung dieses Sachverhalts für die Gasdichtigkeit der Schutzbauten liegt auf der Hand.

Deshalb wurde die Frage der Wasseraufnahme von Rissen noch an einer 1976 fertiggestellten Mehrzweckanlage (Tiefgarage im Kröpcke-Center, Hannover) geprüft, deren Beton wegen des geringen Wasser-Zementwertes ($W/Z \leq 0,52$) allerdings Wasserundurchlässigkeit erwarten ließ.

5.2. Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte im Prinzip wie in Abschnitt 4.2. beschrieben, wobei sich der Einsatz der Apparatur T 2 als problemloser als die Anwendung des Erstgerätes T 1 erwies. Trotzdem mußte der Zeitaufwand im Kurzzeitprüfverfahren günstigenfalls auf mindestens 16 Stunden, das heißt auf zwei Arbeitstage pro Meßstelle, veranschlagt werden, da das Ansetzen der Druckkammer nicht immer im ersten Versuch hinreichend dicht gelingt, abgesehen von nicht ausführbaren Bohrungen (Bewehrung!) für die Halteleisten der Druckkammer und anderen Schwierigkeiten.

Die Messungen erfolgten ausnahmslos im Kurzzeitversuch, also mit aufeinanderfolgend 1, 3 und 7 bar Druck, über jeweils 4 Stunden Dauer, sofern sich nicht bereits beim vorangehenden vierstündigen Wässern oder bei 1 bar Druckbeanspruchung eine so große Eindringung ergab, daß höhere Drücke nicht mehr angewendet werden konnten. Die Prüffläche betrug in allen Fällen $F = 19,5 \text{ cm}^2$. Beispiele für die Durchführung der Messungen an der Pumpstation Villigst zeigen die Bilder 15 bis 21.

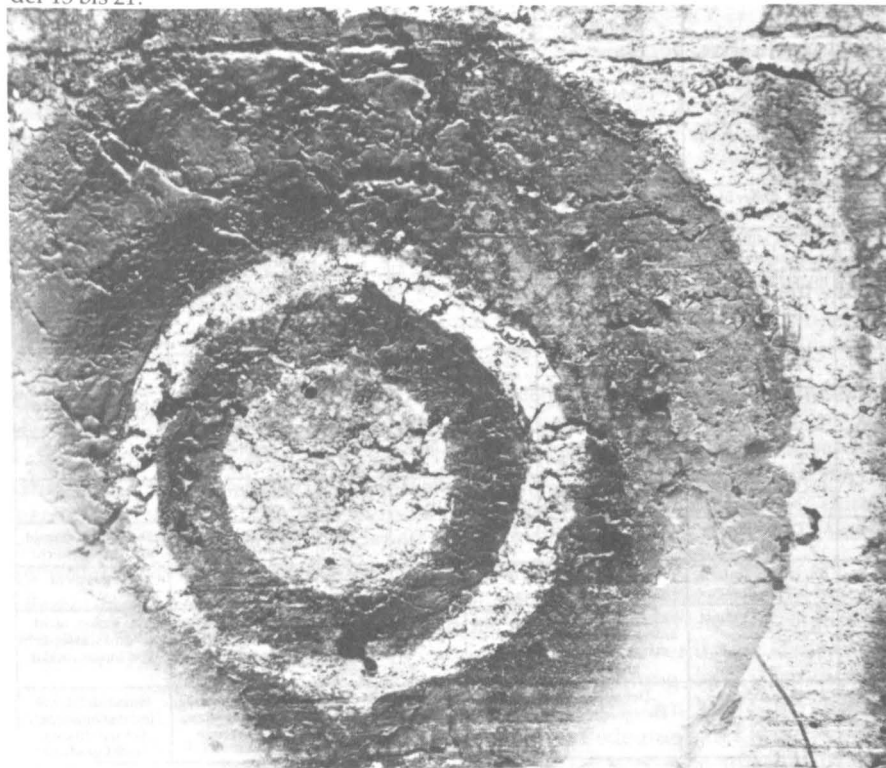


Bild 15: Nahaufnahme von Verdichtungsmängeln

Bild 16: Zur Prüfung vorbereitete Meßstelle mit Kunstkautschuk-Imprägnierung – Voranstrich zum Verschluss von Kleinporen und als Haftgrund für die Dichtung. Zur Halterung der Druckkammer sind 12 Metallspreizdübel angebracht

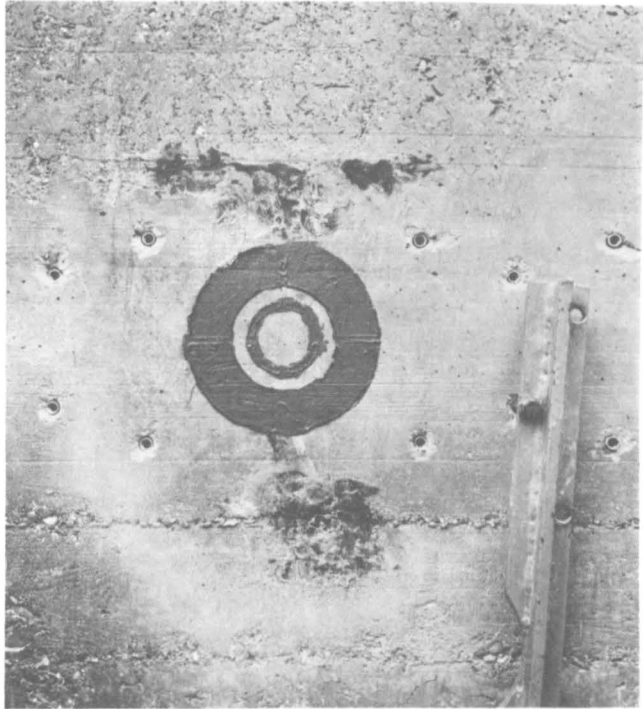
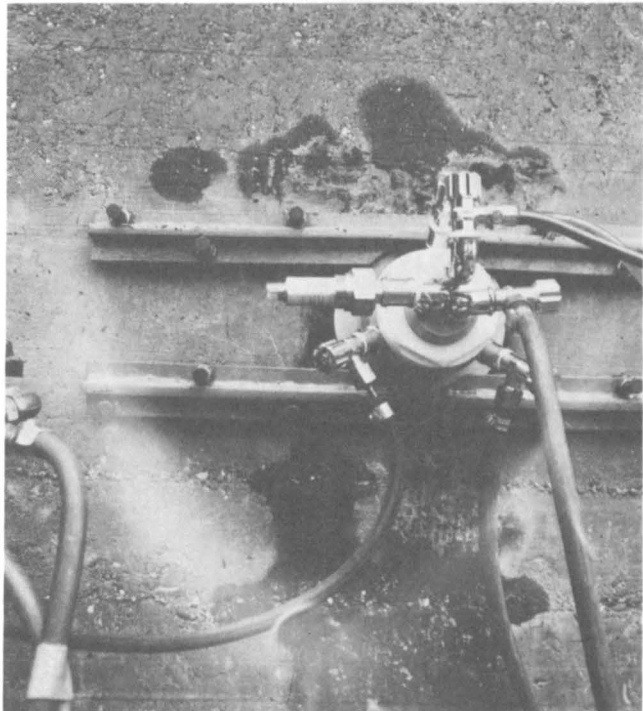


Bild 17: Fortgeschrittene Durchfeuchtung von porösem Beton unter 7 bar Druck. Zu beachten: Die Feuchtigkeit tritt im Umkreis von 50 cm um die Druckmeßdose aus, jedoch nicht im unmittelbaren Bereich unterhalb der Druckmeßdose



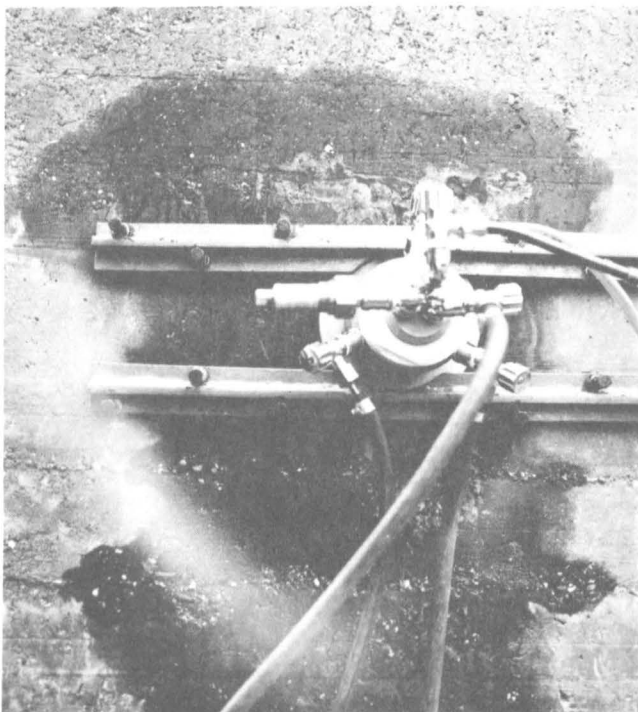


Bild 18: Meßstelle wie Bild 17, jedoch nach allgemeiner Durchfeuchtung mit nunmehr von der Wand ablaufendem Wasser

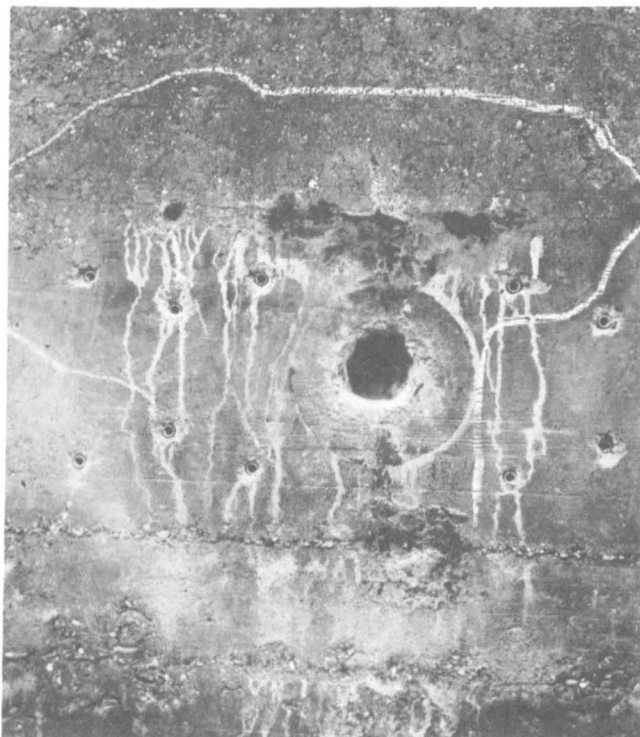


Bild 19: Meßstelle wie Bild 17, Zustand nach Abtrocknung der Feuchtigkeit und nach Aufstemmen der Prüffläche. Kreideumrandung: Bereich größter Durchfeuchtung. Weiße Tropflinien: Aus dem Beton ausgewaschenes Kalziumhydroxid

Bild 20: Meßstelle mit klaffendem Wandriß
 Wandriß
 Prüfdruck ca. 0,07 bar: Wasseraustritt aus Arbeitsfuge ca. 60 cm unterhalb der Druckmeßdose
 Dunkle Verfärbung zwischen Druckkammer und Arbeitsfuge kein Wasser, sondern Kunstharz über der im Beanspruchungsbereich abgedichteten Fuge

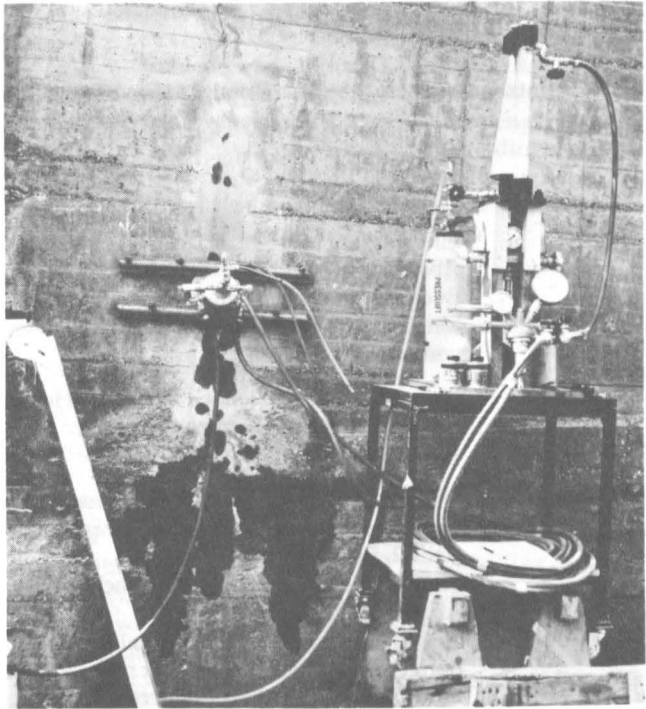
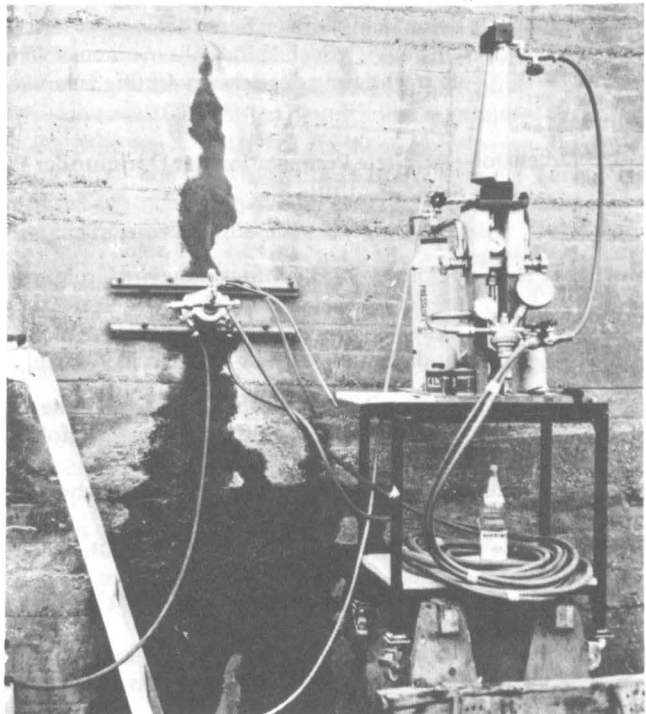


Bild 21: Wie Bild 20,
 Durchfeuchtung gegen Ende des Druckversuchs



5.3. Untersuchungsergebnisse

5.3.1. Schutzbauwerk Hochbunker Borsigstraße, Braunschweig

- Meßstelle 1: Außenwand, innen – Horizontalmessung
 Beton durch Abschlagen von Innenputz und Wärmedämmung freigelegt,
 ausgeprägter, ca. 0,2 bis 0,3 mm breiter Wandriß
 Eindringung unter 1 bar Druck: 850 ml
 Abschätzung der Eindringtiefe: 3590 mm
 (wegen Riß nur hypothetisch)
 Eindringversuch unter höherem Druck wegen zu hohen Wasserverbrauchs nicht durchführbar.
- Meßstelle 2: Neben Meßstelle 1, jedoch kein Riß – Horizontalmessung
 Eindringmenge im Kurzzeit-Versuch: 61 . . . 126 ml
 Abgeschätzte Eindringtiefe: 116 . . . 160 mm
- Meßstelle 3: Decke über Eingangsschleuse, innen – Vertikalmessung Beton durch Aufnehmen von Fußbodenplatten freigelegt neben Meßstelle 2, Riß fraglich
 Eindringmenge im Kurzzeitversuch: $g = 99 \dots 117$ ml
 Abgeschätzte Eindringtiefe: 126 . . . 149 mm
- Meßstelle 4: Außenwand, außen – Horizontalmessung
 poriger, schalungsrauer, aber rißfreier Beton
 Eindringmenge im Kurzzeitversuch: 50 . . . 74 ml
 Abgeschätzte Eindringtiefe: 64 . . . 94 mm
- Gesamturteil: Beton im rissefreien Bereich zwar wasserdurchlässig im Sinne von DIN 1048, jedoch keinesfalls in einem solchen Maße, daß eine Beeinträchtigung der Schutzwirkung zu erwarten ist.

5.3.2. Druckstoßgeschützte Pumpstation der Dortmunder Wasserwerke, Schwerte-Villigst

Außenwände – Messungen von außen – Horizontalmessungen

- Meßstelle 1: Beton mit Verdichtungsmängeln, Grobporen und 0,10 bis 0,15 mm breitem Riß, siehe Bild 15
 „Eindringung“ zeitproportional
 Eindringmenge unter 1 bar Druck: 76,5 ml
- Meßstelle 2: Beton mit sehr poröser Oberfläche, ohne augenscheinlichen Riß
 „Eindringung“ zeitproportional infolge eines umgeleiteten Durchflusses:
 Das Wasser trat an der Eintrittsfläche außerhalb der Prüffläche wieder aus, vergleiche Bild 10 b.
 Eindringmenge je bar Druck: ca. 0,20 ml
- Meßstelle 3: Beton mit 75 µm breitem Riß durch Schlempehaut, siehe Bilder 16 bis 19.
 Riß außerhalb der Innenkammer mit TECHNOVIT abgedichtet
 Eindringung bei 1 bar Druck: etwa Mittel zwischen t und \sqrt{t} -Proportionalität.

Bei 3 bar Druck eindeutige t-Proportionalität (Durchlässigkeit), dagegen bei 7 bar Druck klare \sqrt{t} -Abhängigkeit der Eindringmenge. Die Unterschiede sind dadurch zu erklären, daß die Prüfung innerhalb von 12 Stunden nicht abgeschlossen werden konnte, deshalb wurde am zweiten Tag nochmals 4 Stunden gewässert – unter 1 bar Druck – und dann die Prüfung bei 7 bar durchgeführt. Vermutlich ist am ersten Prüftag unter 3 bar Druck zunächst Wasser in den Riß geflossen, und erst nach Sättigung des Rißvolumens hat die Eindringung in den Beton begonnen.

Eindringmenge unter 7 bar Druck: 1226 ml

Abgeschätzte Eindringtiefe (hypothetisch): 1562 . . . 2412 mm

Nachgewiesene Eindringtiefe > 60 mm

Meßstelle 4: Beton im Mittel mit circa 2 mm breit klaffendem Riß, über die gesamte 2,50 m dicke Wand durchgehend

Die Prüfung sollte klären, ob mit dem T-Gerät eine Durchfeuchtung der Außenwand bis nach innen gelingt.

Zur Vorbereitung der Prüfung wurde der Riß unter- und oberhalb der Prüffläche über circa 1 m Länge geöffnet, gesäubert und mit TECHNOVIT verschlossen. Trotzdem konnte im Versuch kein höherer Druck als 700 mmWS = 0,07 bar aufgebracht werden, weil sonst das Wasser vor allem oberhalb des zugespachtelten Bereichs herausschoß.

Die Messung erstreckte sich über einen Zeitraum von 22 Stunden. In der Anfangsphase konnte über einen Zeitraum bis etwa maximal 12 Minuten Wassereindringung beobachtet werden, die anschließend in einen scheinbar stationären Durchfluß übergang, welcher sich nach 105 Minuten deutlich verlangsamte.

Nach 475 Minuten wurde das zur Mengenummessung dienende Hochdruckrohr aus der Meßleitung entfernt und der Vorratsbehälter direkt angeschlossen. Durch diese Maßnahme sollte der beobachtete direkte Durchfluß durch den gesamten Wandquerschnitt beschleunigt werden, was jedoch in Anbetracht eines Rißvolumens von $0,02 \cdot 25 \cdot 10 = 5 \text{ l/ld. m}$ Rißlänge nicht gelang, obwohl insgesamt rund 20 l Wasser in den Riß gedrückt wurden. Offenbar setzt sich der Riß noch erheblich unter OK-Gelände in das Untergeschoß fort.

Während dieser letzten Versuchsphase wurde wiederum eine höhere Einfließrate ermittelt, was auf einen geringfügig höheren Druck zurückzuführen sein dürfte, bedingt durch

- entweder eine größere Druckdifferenz zwischen den Wasserständen in Vorratsbehälter und Druckkammer
- oder einen verminderten Strömungswiderstand durch Wegfall der Mengenmeßeinrichtung.

Gesamturteil: Beton hochgradig porös und wasserdurchlässig; Wasserdurchlässigkeit im Versuch nur wegen der extremen Dicke der Bauteile nicht zu beobachten.

5.3.3. Mehrzweckanlage Tiefgarage Kröpcke-Center, Hannover

40 cm Schutzraumdecke mit 8 cm Verbundestrich

Deckenriß saniert mit PU-Einkomponenten-Kunststoff – Vertikal-messung

Eindringmenge unter 1 bar Druck: 2755 ml

Abgeschätzte Eindringtiefe (hypothetisch): 3509 mm

Eine Durchfeuchtung der Schutzraumdecke konnte nicht beobachtet werden.

Die Wasseraufnahme stellt sich anhand des Versuchsablaufs so dar: Bei nahezu drucklosem Wasserangebot dringt Wasser zunächst in einen dünnen Riß zwischen Verpreß-Kunststoff und Estrich ein, bis dieses Rißvolumen gefüllt ist, danach beginnt der Eindringvorgang in den Estrich. Unter 1 bar Druck wird jedoch die Dichtungsmasse schnell durchdrungen (an einem Rißufer umspült) und ein größerer Hohlraum – vermutlich zwischen Verschleißestrich (Hohlliegen der Estriche wurde beobachtet) und Stahlbetondecke – aufgefüllt.

Nur so ist es zu erklären, daß in den angeblich sanierten Riß über im Mittel 25 cm Länge rund 4 l Wasser eingespült werden konnten, ohne daß es zur Durchfeuchtung der Schutzraumdecke kam.

Wie auch bei einer Prüfung der Gasdichtigkeit am selben Objekt bestätigt werden konnte, ist Polyurethan-Kunststoff nicht zur Abdichtung von Rissen in Stahlbetonbauteilen geeignet, wenn Gas- und Wasserdichtigkeit gefordert werden muß.

Die zahlreichen Schwindrisse an diesem Objekt führten dazu, daß der in den bautechnischen Grundsätzen für Schutzräume geforderte Luftüberdruck von 5 bis 20 mmWS praktisch nicht gehalten werden konnte; erst eine Rißverpressung mit Kunstharzen brachte die erforderliche Dichtigkeit.

Gesamturteil: Das Vorhandensein von Rissen ist entscheidend für die Wasseraufnahme von Schutzraumdecken. Polyurethan ist zur dauerhaften Sanierung von Risseschäden in Schutzräumen nicht geeignet.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Wasserundurchlässigkeit des Kiesbetons von Schutzbauwerken kann mit Hilfe einer speziell entwickelten Apparatur aus dem Wassereindringverhalten zerstörungsfrei und für die Praxis ausreichend genau abgeschätzt werden, indem aus der aufgenommenen Wassermenge auf die Eindringtiefe geschlossen wird.

Messungen an rund 40 Jahre alten wie auch an aus neuester Zeit stammenden Schutzbauten ergaben, daß der Beton im allgemeinen zwar nicht als „wasserundurchlässig“ im Sinne von DIN 1045 – Eindringtiefe ≤ 5 cm – einzustufen ist, jedoch trotz aller Strukturfehler – selbst bei 7 bar Wasserdruck – in 24 Stunden kaum tiefer als 15 cm durchfeuchtet wird. Wie Untersuchungen an realen Bauwerken zeigten, ist eine Wasserdurchlässigkeit am ehesten durch die in Schutzbauten zahlreichen, über den gesamten Wandquerschnitt verlaufenden Risse zu erwarten, die daher bei Wiederinbetriebnahme älterer Schutzbauten möglichst von außen und innen verschlossen werden sollten. Die Frage nach der hierfür geeigneten Sanierungsmethode wird Gegenstand eines neuen Forschungsvorhabens sein. Bei alten Schutzbauten wurde häufig ein überaus poröser Beton angetroffen. Hier besteht längerfristig die Gefahr, daß die außenliegenden Bewehrungsstähe der Schutzbauten im Laufe der Jahre korrodieren, was zwar kaum zu einem erheblichen Tragsicherheitsverlust führen dürfte, aber doch Risse durch Frostsprengung und Betonabplatzungen begünstigt – durch die mit Volumenvergrößerung einhergehende Korrosion – und damit bei geringen Wanddicken wiederum die Gasdichtigkeit ungünstig beeinflusst.

Von ausschlaggebender Bedeutung für eine zweckbestimmte (Wieder-)Verwendung älterer, rißbehafteter Schutzbauten ist, mehr noch als die Wasserundurchlässigkeit, die Gasdichtigkeit. An einer erst in den Jahren 1975/77 errichteten Mehrzweckanlage, (Tiefgarage im Kröpcke-Center, Hannover) konnte sowohl rechnerisch wie im Versuch festgestellt werden, daß die mit wirtschaftlichen Bauweisen schwer vermeidbaren Schwindrisse im massigen Beton der Schutzräume völlig ausreichen, um die Erzielung des für den ABC-Schutz erforderlichen Innenüberdrucks zu verhindern. Es wird zu prüfen sein, welche Konsequenzen sich hieraus für die Wiederinstandsetzung älterer Schutzbauten ergeben. Die entwickelte Meßapparatur kann auch für diese Aufgaben eingesetzt werden.

Literaturhinweise

[1] Bonzel, J.: Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons.

Betontechnische Berichte 1966.

Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1967.

[2] Valenta, O.: Propustnost a pronikani vody do betonu

Stavermicky Casopis Sav XVIII, 8 – Bratislava 1970.

Dokumentationsstelle für Bautechnik: 62 Literaturnachweise über Gas- und Wasserdichtigkeit von Beton.

Literaturzusammenstellung N 1683 der Dokumentationsstelle für Bautechnik.

Stuttgart 1971.

A

1. ARREDI, Filippo: Ricerche sulla permeabilità dei calcestruzzi <Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Betons [ital.]>. (In: Energia Elettrica. 31 [1954], 2. S. 95–102)

B

2. BERTRANDY, R., R. CAIZERGUES, R. MÉRIGOUX: Mouvement de l'humidité dans les mortiers. (In: Journal des Physique et le Radium. 15 [1954], 12. S. 68–69).
3. BLUNK, G.: Die Wasserdurchlässigkeit von Betonbauten – ein Baustoff- oder ein Konstruktionsproblem? (In: Aus Theorie und Praxis des Stahlbetonbaues. Festschrift f. Gotthart Franz. – Berlin, München: Ernst 1969 S. 212–215).
4. BONZEL, Justus: Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons. (In: Beton. 16. [1966], 9. S. 379–383; Nr. 10. S. 417–421).
5. BREWER, H. W.: Moisture migration, concrete slab-on-ground construction. (In: Portland Cement Association, Research and Development Laboratories. Journal. 7. [1965], 2. S. 2–17).
6. BREYER, Hans: Erfassung des Feingefüges von Beton mit dem Wassersättigungswert-Verfahren nach DIN 52 103, Absatz C. (In: Betonstein-Zeitung. 28. [1962], 12. S. 581–585).

D

7. DIN 1048, Ausg. 1943: Betonprüfungen bei Ausführung von Bauwerken aus Beton und Stahlbeton. Bestimmungen.
8. DIN 1048, Entwurf März 1968: Prüfverfahren für Beton.

E

9. Eine neue Methode zur Messung der Permeabilität von Beton. (In: Zement-Kalk-Gips. 17. [1964], 3. S. 112–115).
10. ELBAKIDZE, M. G., V. B. BONDARENKO: Ob opredelenii vodopronicaemosti betona gidrotechničeskich sooruzenij <Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des Betons von Wasserbauwerken [russ.]>. (In: Gidrotechničeskoe Stroitel'stvo. 37. [1967], 5. S. 30–32).

F

11. Die Feuchtigkeitsabsorption der Innenoberflächen von Beton- und Kunststoffwänden.
(In Kurzberichte aus der Bautorschung. 9. [1968] 8. S. 137-140).
12. *HIKSI R. N. I.* Praktičeskoe primenienie radioaktivnykh indikatorov dlja kontrolja fil'tracii v gidrotehničeskikh sooruzenjach gidroelektrostanij <Praktische Anwendung von radioaktiven Indikatoren zur Kontrolle der Filtration in hydrotechnischen Bauwerken von Wasserkraftwerken [russ.]>.
(In Gidrotehničeskoe Stroitel'stvo. 33. [1963] 1. S. 28-31).

G

13. *GINZBURG, M. B.; G. M. ZADVORNYI; M. B. PETROVSKIJ.* Issledovanie vlijanija dlitel'noj fil'tracii na prochnost' i plotnost' betona plotin <Untersuchungen des Einflusses langwährender Filtration auf Festigkeit und Dichtigkeit des Betons von Staumauern [russ.]>.
(In Gidrotehničeskoe Stroitel'stvo. 39. [1969] 4. S. 10-12).
14. *GOST 4800-59.* Beton gidrotehničeskij. Metody ispytanija betona <Beton für Wasserbau. Prüfmethoden des Betons [russ.]>. 1960.
15. *GRAI u. GOEBEL.* Verhütung von Bauschäden. 2. Aufl.
Stuttgart. Dt. Fachzeitschriften- und Fachbuch-Verl. 1954
16. *GRAHNER, A. G.; R. A. ŠČUKANENKO; N. A. Moščanskij.* Vlijanie chimičeskich dobavok na gazopronicaemost' betona <Einfluß chemischer Zusätze auf die Gasdurchlässigkeit von Beton [russ.]>.
(In Beton i železobeton. 15. (1969), 3. S. 33-36).
17. *GUHLOW, Volker.* Bestimmung der spezifischen Durchströmbarkeit von Beton.
Weimar 1966/67

H

18. *HANRAHAN, L. L.* Porewater pressure in concrete.
(In: Concrete and Constructional Engineering. 61. [1966], 2. S. 63-65).
19. *HANRAHAN, L. L.* Porewater pressure in structural concrete.
(In: Consulting Engineer. 32. [1968], 3. S. 28-31).
20. *HANSEN, R. P.* Capillary moisture movement in concrete.
(In: Australian Civil Engineering and Construction. 7. [1966], 4. S. 31, 33, 35).
21. *HUARI, A.* La perméabilité des bétons aux gaz.
(In: Chimie et Industrie. 82. [1959], 6. S. 834-847).
22. *HUGHES, B. P.; I. R. G. LOWE, J. WALKER.* Diffusion of water in concrete at temperatures between 50 and 95° C.
(In: British Journal of Applied Physics. 17. [1966], 12. S. 1545-1552).

J

23. *JAROCI, W.* Badanie wodoszczelnosci betonu hydrotechnicznego <Untersuchungen über die Wasserdurchlässigkeit von hydrotechnischen Betonen [poln.]>.
(In: Biul. Inst. nauk. techn. ITB. [1962], 10. S. 11-16).

K

24. *KIRILOV, A. P.* O mehanizme fil'tracii vody cerez beton <Über den Mechanismus der Filtration des Wassers durch Beton [russ.]>.
(In Gidrotehničeskoe Stroitel'stvo. 38. [1968], 5. S. 28-31).
25. *KOCALASKIN, F. E.; G. SWENSON.* Methods for rating concrete waterproofing materials
(In ASTM [American Soc. for Testing Materials] Bulletin. [1958], 229. S. 67-72).

26. KOCATASKIN, F.: Permeability of concrete.
(In: Bulletin of the Technical University of Istanbul. 8. [1955]. S. 50–56).
27. KUZNECOV, A. T.: Beton v konstrukcijah podvergajuščichsja nagrevu v gazovoj agressii <Beton in Konstruktionen, die der Hitze und aggressiven Gasen ausgesetzt sind [russ.].>
(In Izvestija vyssich učebnych zavedenij Stroit. i archit. 12. [1969]. 3. S. 83–87).

L

28. LEVY, M.: The permeability and absorption of precast concrete products.
In: Civil Engineering. 55. [1960]. 642. S. 88–90 und Nr. 643. S. 248–251).
29. LEWIS, D. W., W. L. DOLCH, K. B. WOODS: Porosity determinations and the significance of pore characteristics of aggregates.
(In: Proc. Amer. Soc. Testing Materials. 53. [1953]. S. 949–962).
30. LOCHER, F. W., S. SPRUNG: Einwirkung von salzsäurehaltigen PVC-Brandgasen auf Beton.
(In: Beton. 20. [1970]. 2. S. 63–65; Nr. 3. S. 99–104).

M

31. MARILL, L.: La capillarité des bétons manufacturés.
(Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, Publication Technique. No. 75).
32. MARUŠINOVÁ, Stella: Zkoušky vodovzdornosti povrchových vrstev stěn <Prüfungen der Wasserdurchlässigkeit von Oberflächenschichten von Wänden [tschech.].>
(In: Pozemni stavby. 18. [1970]. 2. S. 36–40).
33. MENZEL, Carl: A method for determining the moisture condition of hardened concrete in terms of relative humidity.
In: Proc. Amer. Soc. Testing Materials. 55. [1955]. S. 1085–1108).
34. MERTIN, Wolfgang: Verfahren zur Messung der Feuchtigkeitsverteilung in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen.
(Aus: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Sonderdr. 13. [1964]. 2. S. 495–507).
35. MEULEN, G. J. R. van der, J. van DIJK: A permeability-Testing apparatus for concrete.
(Aus Magazine of Concrete Research. 21. [1969], 67).
36. MURATA, J.: Proposal of method testing permeability of concrete and its application.
(In: RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Paris)/CIP (Council of Iron Producers) Symposium, Helsinki. 1965. Bd. 2., paper 2–10).
37. MURATA, J.: Studies on the permeability of concrete.
(In: Bulletin RILEM [1965], 29. S. 47–54).

N

38. NIELSEN, Knud E. C.: Measurements of water vapour pressure in hardening concrete.
(Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Royal Institute of Technology. Meddelanden. Nr. 35).
39. NYCANDER, Per.: Betongens vattentätthet <Wasserdichtigkeit des Betons [schwed.].>
(In: Betong. 39. [1954], 2. S. 85–107).
40. NYCANDER, Per.: Provning av vattentätthet hos betong med prismaformade provkroppar <Prüfung auf Wasserdichtigkeit bei Beton mit prismaförmigen Betonkörnern [schwed.].>
(In: Betong. 38. [1954], 4. S. 251–260).

P

41. *PÖRSCHMANN, H.*: Feuchtigkeits- und Wärmetransport in warmbehandeltem Beton. (In: Baustoffindustrie. 11. [1968], 4. S. 117–120).
42. *POWERS, T. C.*: Hydraulic pressure in concrete. (In: Proceedings ASCE [American Society of Civil Engineers] 81. [1955], Paper No. 742).
43. *POWERS, T. C.*: Moisture effects in concrete. (In: Proceedings of the Conference on Building Research, Ottawa. Oct. 21–23. 1953).
44. *POWERS, T. C., L. E. COPLAND, J. C. HAYES*: Permeability of portland cement paste. (In: Proc. Amer. Concr. Inst. 51. [1955]. S. 285–298).

R

45. *ROZA, S. A.*: K voprosu o načal'nom gradiente napora pri fil'tracii vody čerez beton <Zur Frage des Anfangsdruckgradienten bei Wassersicherung durch den Beton [russ.]>. (In: Gidrotechničeskoe Stroitel'stvo. 31. [1961], 6. S. 40–41).

S

46. *SALLSTROM, Stig*: Vattentäteth hos dammbyggnadsbetong <Wasserdurchlässigkeit von Beton bei Staudämmen [schwed.]>. (In: Nordisk Betong. 12. [1968]. 1. S. 1–15).
47. *SCHMIDT, G.*: Story of integral waterproofing. (In: Concrete. 66. [1958], 12. S. 26–28).
48. *STAMENKOVIC, H.*: High strength an water impermeability of concrete as a function of surface area of aggregate. (In: Matériaux et Constructions. 3. [1970], 14. S. 91–98).

T

49. *TIMOFEEV, JU. L.*: O vodopronicaemosti betonnyh sred <Wasserdurchlässigkeit von Beton [russ.]>. (In: Izvestija vyssich učebnyh zavedenij. Stroitel'stvo i architektura. 10. [1967], 8. S. 89–95).
50. *TYLER, I. L., Bernard ERLIN*: A proposed simple test for determining the permeability of concrete. (In: Journal of the Research and Development Laboratories, Portland Cement Assoc. 3. [1961], 3. S. 2–7).

V

51. *VERBECKIJ, G. B.*: Ispytanie betona na vodonepronicaemosti <Prüfung von Beton auf Wasserdurchlässigkeit [russ.]>. (In: Gidrotechničeskoe Stroitel'stvo 22. [1953], 8. S. 14–15).
52. *VINKLÖE, R.*: Wasserundurchlässiger Beton – wasserundurchlässige Bauteile. (In: Betonstein-Zeitung. 31. [1965], 3. S. 129–134).
53. *VORONKOV, R. V.*: Vodogazonepronicaemye železobetonnnye konstrukcii s listivoj armaturoj <Gas- und wasserundurchlässige Stahlbetonkonstruktionen mit Stahlblechbewehrung [russ.]>. (In: Beton i Zelezobeton. 16. [1970], 8. S. 30–32).

W

54. *WALZ, Kurt*: Grundlagen und praktische Bedeutung der Undurchlässigkeit des Betons gegen Flüssigkeiten. (In: *Bau und Bauidustrie*. 21. [1968], 3. S. 122–124, 126, 128–129; Nr. 4 S. 240–243).
55. *WALZ, Kurt*: Undurchlässiger Beton. Berlin: Ernst 1956. (Bautechnik-Archiv. 13)
56. *WATANABE, Kozaburo, Shizumaro NAKAMURA, Shozo SUZUKAWA*: <Luftdurchlässigkeit von Beton [japanisch]>. (In: *Semento Gijutsu Nenpo*. 12. [1958]. S. 343–347).
57. *WEIGLER u. REISSMANN*: Zur Prüfung der Wasserdurchlässigkeit von Beton. (In: *Betonstein-Zeitung*. 29. [1963], 5. S. 260–262).
58. *WIERIG, H.-J.*: Ein einfaches Verfahren zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Mörtel und Beton. (In: *Zement-Kalk-Gips*. 16. [1963], 4. S. 125–130).
59. *WIERIG, H.-J.*: Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Zementmörtel und Beton. (In: *Zement-Kalk-Gips*. 18. [1965], 9. S. 471–482).

Y

60. *YOSHII, Toyofujimaru, Hitoaki MORI, Mamuru KANDA*: <Air Permeability of concrete [japanisch]>. In: *Semento Gijutsu Nenpo*. 12. [1958]. S. 339–343).

Z

61. *ZOLLINGER, Rudolf*: Betondichte und Porenfragen. In: *Tiefbau*. 9. [1967], 1. S. 11–17).

DIN 1045: Bemessung der Stahlbetonbauteile.
Ausgabe Januar 1972.

DIN 1048: Prüfverfahren für Beton.
Ausgabe Januar 1972.

Register

- A
Ausbreitungsvorgang 33
- B
Betonmischungen 14, 27
- D
DIN 1048 8, 15
Druckabhängigkeit 16
Druckkammern 25
Durchfeuchtung 8, 14, 38, 41, 43
- E
Eindringmenge 24, 35
Eindringtiefe 9, 22, 35
Eintrittsfläche 34
Ergebnisse 37
Erwartungswerte 33
- G
Gasdichtigkeit 7, 40, 47
- H
Hydrationsgrad 20
- K
Korrelation 20
Korrosion 38
Kurzzeitversuch 29, 40
- M
Meßapparatur 28
- N
Normversuch 11
- P
Prüfbedingungen 19
Prüfdauer 24, 38
Prüfkörper 18
Prüfstand nach DIN 1048 15
Prüfverfahren, zerstörungsfreies 8
- R
Regressionsgerade 21
Risseschäden 46
- S
Saugversuch 12
Schutzbauten 7, 38, 47
Schutzbauwerke 39
Schwindrisse 8, 38, 47
- U
Untersuchungsergebnisse 18, 31, 44
- V
Verdichtungsmängel 40
Versuchsapparatur, transportable 25
Versuchsdauer 22
Versuchsdurchführung 13
Versuchskörper 13, 14, 27
Versuchsprogramm 15
Vertrauensbereich 21
Vorhersagbarkeit 23
- W
Wasseraufnahme 16, 17
Wasserdichtigkeit 7, 8
Wasserdurchfluß 17
Wasserdurchlässigkeit
 von Zementstein 10
Wassereindringfront 9
Wassereindringtiefe 9, 24, 36
Wassereindringung 17
Wassereindringverhalten 32, 47
Wassereindringzahl 10
Wassermenge 10
Wassertransport, kapillarer 11
Wasserundurchlässigkeit 8, 47
Wasserzementwert 7, 10
Wiederinbetriebnahme 47
- Z
Zeitmaßstab 17
zerstörungsfreies Prüfverfahren 8
Zylindermantel 34

Zivilschutz- Forschung

Schriftenreihe der Schutzkommission beim Bundesminister des Innern

Herausgegeben vom Bundesamt für Zivilschutz

Bisher erschienen:

Band 1:

Schutzkommission beim Bundesminister des Innern.

25 Jahre Forschung für den Zivil- und Katastrophenschutz

1975, 124 Seiten, 9 Abb., Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0038-6

Band 2

Beiträge zur Frage der Erholung von Strahlenschäden

1975, 108 Seiten, 69 Abb., Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0039-4

Band 3

Prof. Dr. Rainer Lesch:

**Strahlenempfindlichkeit und die akute und chronische
Strahlenschädigung der Leber**

1976, 128 Seiten, 39 Abb., 5 Tabellen, Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0047-5

Band 4

Prof. Dr. Hartwig Schönborn:

**Untersuchungen zu Therapie und Prognose
des Kreislaufschocks beim Menschen**

1976, 160 Seiten, 46 Abb., 14 Tabellen, Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0048-3

Band 5

Prof. Dr. Otfried Messerschmidt

Kombinationsschäden als Folge nuklearer Explosionen

1977, 64 Seiten, 23 Abb., Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0055-6

Band 6

Anke Kindt/Prof. Dr. Ernst-Ludwig Sattler

Literaturübersicht zur Frage der Erholung nach Ganzkörperbestrahlung

1977, 64 Seiten, 32 Abb., 7 Tabellen, Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0058-0

Band 7

Akad.-Dir. Dr.-Ing. Joachim Steinert

**Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton
aus dem Wassereindringverhalten**

1977, 64 Seiten, 22 Abb., 13 Tabellen, Broschur, 16.– DM

ISBN 3-7894-0056-4

Osang Verlag · In der Lache 1 · 5465 Erpel/Rhein

26. Sep. 1985
26. Sep. 1985