

BAM-BERICHT Nr. 36

DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

108 Seiten mit 103 Abbildungen und 4 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
1 Berlin 45, Unter den Eichen 87
Telefon (030) 8104-1
Telex 01-83 261 bamb d

Den Herren Professor Dr.-Ing. F. Pilny und Professor Dr.-Ing. K. Altmann danke ich für die Betreuung der Dissertation sowie für wertvolle Ratschläge und Hinweise.

Dem Leiter der Abteilung "Bauwesen", Herrn Professor Dipl.-Ing. W. Caemmerer, und dem Leiter der Fachgruppe "Mineralische Baustoffe", Herrn Professor Dr. rer. nat. P. Schimmelwitz, gilt mein Dank für die stete Förderung und Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Für die Mitwirkung bei der Entwicklung der Neutronenmeßeinrichtung bin ich Herrn Dipl.-Phys. J. Buschmann verpflichtet. An der Durchführung der Versuche und deren technischer Auswertung waren mehrere Mitarbeiter beteiligt; stellvertretend für diese danke ich Herrn Ing. (grad.) H. Kantelberg sehr herzlich für die geleistete Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt dem Präsidenten der BAM, Herrn Professor Dr. rer. nat. G. W. Becker, für alle Mittel und Hilfen, die für dieses Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt wurden.

Gedankt sei auch dem Bundesminister für Forschung und Technologie, der das Vorhaben durch Bereitstellung von Mitteln (Förderungskennzeichen RK 21 I) gefördert hat.

Berlin, im Januar 1976

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. <u>Einleitung</u>	9
1. <u>Stand der Kenntnisse und Aufgabenstellung</u>	9
1.0. <u>Aufbau von Beton</u>	9
1.1. <u>Erhärtung von Zementstein</u>	9
1.1.1. Struktur	9
1.1.2. Porenraum	10
1.1.3. Wasser im Porenraum	10
1.1.4. Technologische Eigenschaften	11
1.2. <u>Einfluß erhöhter Temperaturen auf das Verhalten von Beton</u>	11
1.2.0. Anforderungen an Reaktorbeton	11
1.2.1. Hydratationswärme	12
1.2.2. Wärme- und Feuchtigkeitsleitung	12
1.2.3. Technologische Eigenschaften	13
1.3. <u>Aufgabenstellung</u>	14
2. <u>Eigene Untersuchungen</u>	15
2.1. <u>Versuchsmaterialien und Versuchsprogramm</u>	15
2.1.1. Versuchsmaterialien	15
2.1.1.1. Betonausgangsstoffe	15
2.1.1.2. Betone	16
2.1.1.3. Matrixmörtel	18
2.1.1.4. Zementmörtel und Zementstein	19
2.1.2. Versuchsbedingungen, -aufbau und -durchführung	19
2.1.2.1. Versuche an den Betonbalken	19
2.1.2.1.1. Versuchsanordnung	19
2.1.2.1.2. Durchführung der Versuche	22
2.1.2.2. Versuche an Probekörpern	22
2.2. <u>Messungen an den Betonbalken</u>	23
2.2.1. Temperatur	23
2.2.1.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	23
2.2.1.2. Meßergebnisse	24
2.2.2. Wärmestrom	24
2.2.2.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	24
2.2.2.2. Meßergebnisse	25
2.2.3. Wassergehalt	28
2.2.3.0. Auswahl der Meßmethoden	28
2.2.3.1. Wägeverfahren zur Bestimmung der Gewichtsverluste	29
2.2.3.1.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	29
2.2.3.1.2. Meßergebnisse	29

	Seite	
2.2.3.2.	Feuchtigkeitsmeßelemente	29
2.2.3.2.1.	Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	29
2.2.3.2.2.	Meßergebnisse	33
2.2.3.3.	Neutronensonde	34
2.2.3.3.1.	Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	34
2.2.3.3.2.	Meßergebnisse	37
2.2.4.	Längenänderungen	43
2.2.4.1.	Änderungen der Gesamtlänge der Balken	43
2.2.4.1.1.	Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	43
2.2.4.1.2.	Meßergebnisse	44
2.2.4.2.	Lokale Längenänderungen im Beton	44
2.2.4.2.1.	Meßverfahren, -anordnung und -durchführung	44
2.2.4.2.2.	Meßergebnisse	46
2.2.5.	Abschließende Messungen an Betonproben aus den Balken 3 und 6	46
2.2.5.1.	Probekörper, Umfang und Durchführung der Messungen	46
2.2.5.2.	Meßergebnisse	47
2.3.	<u>Untersuchungen zur Gefügeentwicklung des Betons</u>	48
2.3.1.	Entwässerungsversuche an Zementstein	48
2.3.1.1.	Meßverfahren und Versuchsdurchführung	48
2.3.1.2.	Meßergebnisse	50
2.3.2.	Verdampfbares und nicht verdampfbares Wasser	50
2.3.2.1.	Meßverfahren und Versuchsdurchführung	50
2.3.2.2.	Meßergebnisse	52
2.3.3.	Gesamtporosität	53
2.3.3.1.	Meßverfahren und Versuchsdurchführung	53
2.3.3.2.	Meßergebnisse	54
2.3.4.	Porengrößenverteilung	54
2.3.4.1.	Meßverfahren und Versuchsdurchführung	54
2.3.4.2.	Meßergebnisse	56
2.4.	<u>Untersuchungen zur Entwicklung der mechanischen Eigenschaften des Betons</u>	62
2.4.1.	Schrumpfen, Schwinden und thermische Ausdehnung	62
2.4.1.1.	Meßverfahren und Versuchsdurchführung	62
2.4.1.2.	Meßergebnisse	63
2.4.2.	Biegezug- und Druckfestigkeit von Zementstein, Zementmörtel und Beton	65
2.4.2.1.	Meßverfahren und Versuchsdurchführung	65
2.4.2.2.	Meßergebnisse	65

	Seite	
2.5.	<u>Korrelation thermisch-hygrisch beeinflüßter Kennwerte</u>	67
2.5.0.	Umfang der Untersuchungen	67
2.5.1.	Aufstellung der Wasserbilanzen	67
2.5.2.	Längenänderungen	69
2.5.3.	Druckfestigkeit	70
2.5.4.	Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt	71
3.	<u>Diskussion der Untersuchungsergebnisse</u>	74
3.1.	<u>Thermische Vorgänge in den Betonbalken</u>	74
3.1.1.	Einfluß der Hydratationswärme	74
3.1.2.	Einfluß der Beheizung	74
3.2.	<u>Hygrische Vorgänge in den Betonbalken</u>	75
3.2.1.	Feuchtigkeitsgehalt und chemische Bindung von Wasser	75
3.2.2.	Einflüsse von Hydratation und Feuchtigkeitsleitung auf den Wassergehalt	77
3.2.2.1.	Veränderungen im abgeschlossenen System	77
3.2.2.2.	Veränderungen nach Heizbeginn	78
3.2.2.2.1.	Feuchtigkeitsverluste infolge Trocknung	78
3.2.2.2.2.	Deutung des Trocknungsverlaufes unter Einwirkung eines Temperaturgefälles	79
3.2.2.2.3.	Nicht verdampfbares Wasser	80
3.2.3.	Vergleich der Ergebnisse	81
3.3.	<u>Einfluß der thermisch-hygrischen Vorgänge auf die Porenstruktur</u>	81
3.3.1.	Gesamtporosität und offene Porosität	81
3.3.2.	Porengrößenverteilung	82
3.3.2.0.	Beurteilung des Meßverfahrens	82
3.3.2.1.	Zementstein und Zuschläge	82
3.3.2.2.	Matrixmörtel	83
3.3.3.	Vergleich der Ergebnisse	84
3.4.	<u>Entwicklung der technologischen Eigenschaften</u>	86
3.4.1.	Schrumpfen, Schwinden und thermische Ausdehnung	86
3.4.2.	Druckfestigkeit	87
3.4.3.	Wärmeleitfähigkeit	88
4.	<u>Zusammenfassung</u>	88
	Schrifttum	90
	Bildanhang	94

Inhalt

Die beim Betrieb von Reaktoren bei Verwendung von dickwandigen Spannbeton-Reaktordruckbehältern im Beton entstehenden Temperaturen beeinflussen dessen Wärme- und Feuchtigkeitsleitung. Derartige Vorgänge wurden an je drei balkenförmigen Probekörpern aus Beton mit gebrochenem (calcitischem) Zuschlag bzw. ungebrochenem (Rhein-Kiessand-) Zuschlag untersucht. Die Erscheinungen stehen in Beziehung zu der Gefügeentwicklung des Betons, was durch Serienbestimmung des Gehaltes an nicht verdampfbarem Wasser, der Gesamtporosität sowie der Porengrößenverteilung nachgewiesen werden kann. Die örtlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen beeinflussen auch die technologischen Eigenschaften, von denen Druckfestigkeit, Längenänderungen infolge Schrumpfens und Schwindens sowie Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit ermittelt worden sind.

Abstract

Due to temperature, reactors in operation cause heat and moisture flow in the thick-walled prestressed reactor pressure vessels, which was studied in three beams of concrete made with crushed limestone aggregate and in three beams made with original Rhine gravel/sand aggregate. The transport phenomena in concrete are connected with the development of structure which was proved by controlling the content of non evaporable water, total porosity and pore size distribution. Moreover the local temperature and moisture conditions are of particular influence on the technological properties of which compressive strength, shrinkage, thermal expansion and thermal conductivity were determined.

Sujet

Les températures obtenues dans les récipients à pression à parois épaisses en béton précontraint durant le fonctionnement du réacteur provoquent des processus de transport de chaleur et d'humidité qui ont été étudiés sur trois poutres en béton à agrégat calcitique broyé et sur trois poutres à agrégat gravillon/sable original, provenant du Rhin. Ces phénomènes sont en rapport avec le développement de la structure du béton, ce qui a été prouvé par des déterminations en série du contenu d'eau non évaporable, de la porosité totale ainsi que de la répartition dimensionnelle des pores. Les conditions locales de température et d'humidité exercent aussi une influence sur les propriétés technologiques, dont on a déterminé la résistance à la pression, les variations de longueur dues au retrait, ainsi que la dilatation et la conductivité thermiques.

Häufig benutzte Formelzeichen und Abkürzungen

ϱ	- Rohdichte	}	kg/dm ³ ($\hat{=} 10^3$ kg/m ³)
ϱ_f	- Frischrohdichte		
ϱ_{tr}	- Trockenrohdichte (Trocknung bei 105 °C)		
ϱ_0	- Dichte	}	N / mm ² (≈ 10 kp/cm ²)
β_D	- Druckfestigkeit		
β_B	- Biegezugfestigkeit		
Δl	- Längenänderung		μm
ε	- Dehnung $\Delta l/l$		$\mu\text{m}/\text{m}$
ϑ	- Temperatur		°C; K
α	- linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient		10 ⁻⁶ /°C
q	- Wärmestromdichte		W/m ²
λ	- Wärmeleitfähigkeit		W/m·K
R	- Neutronenmeßrate		Imp./min
w	- Wassergehalt ⁺) (bezogen auf das bei 105 °C getrocknete Material)		g/dm ³ ; Vol.-%
A	- Wasseraufnahme		Vol.-%
u	- Porenvolumen		%; cm ³ /g
r	- Porenradius		nm
U_t	- Gesamtporosität		%
U_{Hg}	- mit dem Quecksilberporosimeter insgesamt erfaßtes Porenvolumen		cm ³ /g
R.F.	- relative Feuchte der Luft		%
N	- Anzahl der Meßwerte		
s	- Standardabweichung		
t	- Testgröße		

⁺) Gehalt an verdampfbarem und/oder nicht verdampfbarem Wasser

0. Einleitung

Im Ingenieurbau werden an den Baustoff Beton in zunehmendem Maße höhere Anforderungen gestellt, und zwar sowohl hinsichtlich seiner Funktion als Bestandteil tragender Bauteile als auch im Hinblick auf andere technologische Eigenschaften, wie z. B. die Wärmedämmung, die Undurchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten oder Gasen und die Abschirmung gegenüber radioaktiver Strahlung. Am Beispiel der Kernkraftwerke wird deutlich, daß die Verwendung von Beton als Baustoff für Kernreaktorbehälter zu einer umfangreichen bautechnischen Entwicklung geführt hat. In der Bundesrepublik Deutschland wurde im Hinblick auf die Aufgabe, Reaktordruckbehälter aus Spannbeton zu bauen, ein Grundsatzprogramm*) aufgestellt, das neben sicherheitstechnischen Gesichtspunkten vor allem auch betontechnologische Grundlagenforschung enthält (8). Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit einer wichtigen Teilaufgabe dieses Programms, nämlich mit der Untersuchung der Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in thermisch beanspruchten Betonkonstruktionen sowie den damit zusammenhängenden Strukturänderungen des Zementsteins. Die während des Betriebes in dickwandigen Reaktorbehältern entstehenden Temperaturen beeinflussen nicht nur den thermisch-hygrischen Gleichgewichtszustand, den das Bauteil unter normalen Bedingungen erlangt, sondern auch die technologischen Eigenschaften des Betons.

1. Stand der Kenntnisse und Aufgabenstellung

1.0. Aufbau von Beton

Beton besteht aus Zuschlägen, Zementstein, Wasser und Luft. Während der Erhärtung ändert sich das Verhältnis seiner festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteile untereinander, während infolge chemischer und physikalischer Vorgänge aus der beim Mischen von Wasser und Zement entstandenen Paste Zementstein gebildet wird. Volumen und Beschaffenheit des mit Wasser und Luft gefüllten Porenraumes eines Betons hängen im wesentlichen von der Eigenporosität der Zuschläge, vom W/Z-Wert und von der Verdichtung des Frischbetongemenges ab. Die Erhärtungsvorgänge im Zementstein können zwar in gewissem Umfange von Besonderheiten des Zuschlages beeinflußt werden, sind aber bei Normalbetonen mit dichtem Gefüge im wesentlichen durch den W/Z-Wert und die Lagerungsbedingungen bestimmt.

*) Grundsatzprogramm der deutschen Forschung und Entwicklung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern (SBB)

1.1. Erhärtung von Zementstein

1.1.1. Struktur

Portlandzemente bestehen bis zu 80% aus Calciumsilicaten, die sich nach dem Mischen mit Wasser zu Calciumsilicathydraten und Calciumhydroxid umsetzen. Nach K ü h l (9) vollzieht sich die hydraulische Erhärtung, die die Vorgänge der Hydrolyse, Hydratation und Gelbildung umfaßt, sowohl durch "Inlösungsgehen des Ausgangsmaterials" (Entstehung von Hydratationsprodukten nach den Vorstellungen L e C h a t e l i e r s), zum Teil aber auch durch unmittelbare Wasseranlagerung an die feste Phase des Ausgangsmaterials (Entstehung von Gelhüllen nach den Vorstellungen von M i c h a e l i s). Die Calciumsilicathydrate sind die Hauptbestandteile des erhärteten Zementsteins und bestimmen weitgehend dessen Eigenschaften (10, 11, 12, 13). Vollständig hydratisierter Zementstein besteht zu ca. 25 Gew.-% aus Calciumhydroxid und zu 50 Gew.-% aus Calciumsilicathydraten unterschiedlicher Bildungsformen (CSH-Phasen). Nach dem von P o w e r s und B r o w n y a r d (14) entworfenen Strukturmodell des Zementsteins, das weitgehende Bestätigung gefunden hat (15) und auch in jüngster Zeit weiterentwickelt wird (vgl. z. B. (16), besteht der Feststoffanteil des Zementsteins 1) aus kolloidalen Bestandteilen, dem Gel, 2) aus darin eingebetteten wesentlich größeren Kristallen und 3) aus ursprünglich mit Wasser gefüllten Kapillarporen. Die anhand umfangreichen Datenmaterials über spezifische Oberfläche (17), Dichte, Permeabilität und Festigkeit gewonnenen Vorstellung gehen davon aus, daß es sich bei dem von den Calciumsilicathydraten gebildeten Zementgel um feine dünnblättrige Teilchen (2 bis 3 Moleküldicken $\hat{=}$ 2 bis 3 nm) handelt, die aufgrund ihrer großen Oberflächen und der dadurch aktivierten Kräfte für die hohen Festigkeiten verantwortlich sind. Das wegen seiner Natur auch Tobermoritgel genannte Material wächst in die Kapillarporen hinein, wobei auf deren Kosten Gelporen gebildet werden. Gelporen haben - je nach Formfaktor - mittlere Porenradien zwischen 1 und 2 nm (14), während die Kapillarporen größere Radien aufweisen, nämlich oberhalb von etwa 4 nm (vgl. dazu auch (18)). Schon hinsichtlich der Entstehungsgeschichte sind demnach die Gelporen von den Kapillarporen verschieden.

Es wird ferner angenommen (14), daß die Kapillarporen in frischer Zementpaste ein Netzwerk bilden, das bei fortschreitender Reifung mehr und mehr mit Hydratationsprodukten gefüllt wird, bis der Kapillarporenraum ausgefüllt ist oder sich alle Klinkerkörner umgesetzt haben. Im Gegensatz zu dem aus charakteristischen Porengrößen bestehenden Gelporenraum, der bei vollständiger Hydratation etwa 28 Vol.-% erreichen soll (19), hängt das Kapillarporenvolu-

men vom W/Z-Wert und vom Reifegrad des jeweiligen Zementsteins ab. Da zur vollständigen Hydratation etwa 25 % des Zementgewichtes als chemisch gebundenes Wasser und 15 % als Gelwasser verbraucht werden, ist zu folgern (10), daß Zementpasten mit W/Z-Werten $< 0,4$ auch nach sehr langer Zeit noch unzeretzte Klinkerkörner enthalten müssen. Andererseits sind in Zementstein mit W/Z-Werten bis 0,7 im reifen Zustand Kapillarporen nur über Gelporen zugänglich; oberhalb des genannten W/Z-Wertes entstehen in der Zementpaste Kapillarräume, die wegen ihrer Größe mit Hydratationsprodukten nicht mehr "zuwachsen" können, so daß die Durchlässigkeit des Porensystems erheblich zunimmt.

1.1.2. Porenraum

Die Ansichten über Gestalt und Beschaffenheit der Bestandteile des Zementsteins sowie des von ihnen gebildeten Porenraumes sind zum Teil unterschiedlich. R i c h a r t z und L o c h e r (12) fanden, daß die kristallinen Calciumsilicathydrate meist faserig ausgebildet sind und aus aufgerollten Folien in Röhrenstruktur bestehen. Sie bilden mit zunehmender Hydratationszeit ein dichter werdendes Netz. Calciumhydroxid bildet dagegen dünntafelige Kristalle, die mit fortgeschrittener Hydratationszeit schon vorhandene Hydratationsprodukte umhüllen. Da diese röhrenförmigen Calciumsilicathydrate unterschiedliche Durchmesser haben, bilden sie auch unterschiedliche Porengrößen einer kontinuierlichen Verteilung. W i n s l o w und D i a m o n d (20) kommen aufgrund von rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen ebenfalls zu der Meinung, daß Porengrößen zwischen den Gelporen und den Kapillarporen existieren. Demnach müßte das den Gelporen zuzurechnende Volumen $< 28\%$ sein, was sich mit Hilfe von Gesamtporositäts- und Penetrationsmessungen auch bestätigen läßt.

Unabhängig von diesen noch nicht eindeutig gelösten Fragen, die vor allem auch für die Bindung des Wassers im Porenraum von Bedeutung sind, ist festzuhalten, daß die Hydratationsprodukte des Zementsteins mit fortschreitendem Alter einen dichter werdenden Verband bilden, wobei der Gelporenraum zunimmt und die spezifische Oberfläche Werte von ca. $175 \text{ m}^2/\text{g}$ ((17), vgl. auch (21)) erreicht. Da dies auf Kosten des Kapillarporenraumes geschieht, dessen "Ausgangsvolumen" vom W/Z-Wert abhängt, wird das nach vollständiger Hydratation erreichte Gesamtporenvolumen ($\hat{=}$ Gesamtporosität) durch den W/Z-Wert bestimmt. Die Volumenänderungen können abgeschätzt werden, wobei zu berücksichtigen ist, daß das Gesamtvolumen von Zement und Wasser bei der Hydratation verkleinert wird ("Schrumpfung") und daß neben dem chemisch gebundenen Wasser etwa 15% des Zement-

gewichtes als Gelwasser angelagert wird. Diese Zusammenhänge werden in (22) sehr anschaulich dargestellt.

Für die Kennzeichnung des Porenraumes stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung (23, 24). Neben den optischen Verfahren (Licht- und Elektronenmikroskopie) sind dies vor allem indirekte Verfahren, wie z. B. das der Wasseraufnahme, der Quecksilberporosimetrie oder der Sorption verschiedener Medien, bei denen von einer bestimmten Meßgröße ausgehend (z. B. vom Porenvolumen) mit Hilfe einer theoretischen Modellbeziehung auf andere Eigenschaften des Porenraumes geschlossen wird (z. B. auf die Porengrößenverteilung). So geben z. B. Permeabilitätsmessungen Aufschluß über Porenform und -anordnung. Weil die Durchlässigkeit des Porensystems mit zunehmendem W/Z-Wert sehr viel schneller anwächst als die Gesamtporosität, ist zu folgern, daß die Porenradien mit zunehmenden W/Z-Wert wesentlich größer werden (11).

1.1.3. Wasser im Porenraum

Zementstein enthält Wasser in flüssiger Form ("Kapillarwasser") sowie in Form von Wasserdampf, als adsorptiv gebundenes Wasser ("Sorbat-Wasser") und als chemisch gebundenes Wasser. Eine genaue Unterscheidung nach Bindungsarten ist experimentell kaum möglich, "weil der Dissoziationsdruck der Hydratationsprodukte, der Wasserdampfdruck des adsorbierten und des freien Wassers kontinuierlich ineinander übergehen" (25). Die in (12) wiedergegebenen Untersuchungen haben z. B. auch gezeigt, daß das in den röhrenförmigen Calciumsilicathydraten eingelagerte Zwischenschichtwasser dem chemisch gebundenen Wasser zuzurechnen ist, obwohl es bei der Vakuumtrocknung verdampft.

So hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Gesamtwassergehalt nach P o w e r s und B r o w n y a r d (14) in verdampfbares und nicht verdampfbares Wasser zu unterteilen. Bei dem von den beiden Autoren benutzten Trocknungsverfahren, das C o p e l a n d und H a y e s (26) weiterentwickelt haben, ist das nicht verdampfbares Wasser annähernd dem chemisch gebundenen Wasser gleichzusetzen. ⁺

Bei dem aus praktischen Gründen üblicherweise angewandten Verfahren, durch Wärmebehandlung bei etwa $105 \text{ }^\circ\text{C}$ den Gehalt an "freiem Wasser" zu ermitteln, wird vernachlässigt, 1) daß bei der Wärmebehandlung das adsorptiv gebundene Was-

⁺ Der nachfolgend auch benutzte Begriffe "Feuchtigkeitsgehalt", der dem verdampfbares Wasser entspricht, kennzeichnet die verschiedenartigen Erscheinungsformen. Hinsichtlich des Begriffes "hygroskopischer Feuchtigkeitsgehalt" vgl. (27).

ser u. U. nicht vollständig ausgetrieben wird und 2) daß der Zementstein auch bei dieser Temperatur bereits Wasser abgibt, welches eigentlich dem chemisch gebundenen zuzurechnen ist. So hat man z. B. versucht, die Reproduzierbarkeit des Verfahrens durch eine hohe Konstanz der Trockentemperatur sowie Vorgabe der Trockenzeit (28) zu verbessern.

Die bei der Trocknung zu überwindenden Kräfte sind von der jeweils vorliegenden Bindungsart abhängig. Sieht man von der chemischen Bindung ab, dann handelt es sich zum einen um Kapillarkräfte, die vom Kapillarradius sowie der Oberflächenspannung und dem Randwinkel des Mediums bestimmt werden. Zum anderen sind es van-der-Waals-Kräfte, die Wassermoleküle mehrschichtig an Oberflächen halten. Die speziellen Bedingungen des Porenraumes kommen in den zur Kennzeichnung des Trocknungsverhaltens von Zementstein und Betonen von zahlreichen Autoren (z. B. (29)) gemessenen Sorptionsisothermen zum Ausdruck. Dabei kann der Wassergehalt auch zu den nach der Theorie der Kapillarkondensation gefüllten Porengrößen mit Radien zwischen 0,1 bis 50 nm in Beziehung gesetzt werden (30).

Neben dem Verfahren, den Feuchtigkeitsgehalt in Zementstein und auch in Beton mit Hilfe des Gewichtsverlustes infolge Wärmebehandlung bei 105 °C zu kennzeichnen ("gravimetrisches Verfahren"), werden die verschiedenartigsten physikalischen Effekte zur Feuchtigkeitsmessung benutzt, deren Anwendung weitgehend von den jeweiligen experimentellen Gegebenheiten abhängt. A l t m a n n (31) gibt eine Zusammenstellung der gebräuchlichsten Verfahren (vgl. dazu auch (32)).

1.1.4. Technologische Eigenschaften

Neben den inneren - grenzflächenenergetischen - Kräften sind die äußeren Bedingungen von Einfluß auf die Erhärtung und den Zustand des Zementsteins. Ebenso wie bei den vorangegangenen Überlegungen wird davon ausgegangen, daß sich die Erhärtung bei Raumtemperatur von etwa 20 °C und einer rel. Feuchte > 80% vollzieht, so daß der für die Reaktionsabläufe notwendige Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt des Zementsteins oder Betons nicht unterschritten wird (vgl. (29)). Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, daß Carbonatisierungsvorgänge, die ebenfalls Strukturänderungen verursachen, hier nicht berücksichtigt werden, weil sie i. a. nur für Flächen mit unmittelbarem Luftzutritt von Bedeutung sind und überdies sehr langsam ablaufen.

Da die Festigkeit des Zementsteins im wesentlichen von den zwischen den Gelpartikeln herrschenden Oberflächenkräften abhängt, nimmt sie mit dem Alter, d. h. mit wachsender Menge

der Hydratationsprodukte zu. Ferner werden sowohl die Druck- als auch die Biegezugfestigkeit von der Gesamtporosität bestimmt, und da diese vom W/Z-Wert abhängt, besteht zwischen Festigkeit und W/Z-Wert ein unmittelbarer Zusammenhang (33). Im Hinblick auf den Porenraum des Betons weist P i l n y (34) darauf hin, daß die größeren Hohlräume, die auf mangelhafte Verdichtung zurückzuführen sind, zur Minderung der Festigkeit noch weit mehr beitragen als die vom W/Z-Wert abhängige Porosität.

Porenraum und Feuchtigkeitshaushalt stehen in enger Wechselbeziehung zu den wichtigsten technologischen Eigenschaften des Zementsteins und Betons. So ist das Schrumpfen nach dem Betonieren auf die anfangs heftige und dann langsamer werdende chemische Bindung von Wasser zurückzuführen. Dagegen wird das reversible Schwinden bzw. Quellen offenbar durch Veränderungen des inneren Spannungszustandes beim Austrocknen bzw. Füllen der Kapillaren verursacht. Die irreversiblen, deutlich von der Porosität abhängigen Schwindverformungen werden Strukturänderungen des Zementsteins zugeschrieben (35, 34, 11). Langsames Ausweichen von Wasser aus den Kapillaren wird z. B. auch als Ursache für das unter Last auftretende Kriechen von Zementstein angesehen (34, 36). Aus den zahlreichen Beiträgen zu diesem Problem sind die Arbeiten von B a ž a n t hervorzuheben, der die Wechselwirkung zwischen den durch die Mikrostruktur bedingten Oberflächen und dem Wasser, das in unterschiedlicher Schichtdicke adsorbiert ist, als bestimmenden Mechanismus für das Kriechen betrachtet (z. B. 37, 38).

1.2. Einfluß erhöhter Temperaturen auf das Verhalten von Beton

1.2.0. Anforderungen an Reaktorbeton

Da Beton wirksamen Schutz gegen die wegen ihres Durchdringvermögens besonders gefährliche γ - und n-Strahlung bietet, wird er vorteilhaft als Baustoff im Kernreaktorbau eingesetzt (36). Die Abschirmung der γ -Strahlung wird durch die verhältnismäßig große Masse bei großer Wanddicke bewerkstelligt, während der Neutronenfluß vor allem von den im Zementstein vorhandenen Wasserstoffatomen abgremst wird (vgl. dazu z. B. (40)). Die Verwendung von Beton in dickwandigen Behälterkonstruktionen setzt jedoch auch genaue Kenntnisse über die infolge der thermischen Belastung zu erwartenden Vorgänge im Porenraum voraus, dessen Entwicklung durch die Veränderung der thermisch-hygrischen Bedingungen beeinflusst wird. E i b l et al. (41) haben im Rahmen des SBB-Programmes (vgl. (8)) eine "Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im Reaktordruckbehälterbau" vorgelegt, in der über den Stand der Kenntnisse berichtet wird. Dabei wird

für den "Lastfall Temperatur" des Behälters eine Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite von 60 °C zugrundegelegt.

1.2.1. Hydrationswärme

Die thermische Beanspruchung des Behälters wird zu einem Zeitpunkt einsetzen, zu dem sich der Beton bereits in fortgeschrittenem Alter befindet und einen verhältnismäßig hohen Reifegrad erreicht hat. Seine Eigenschaften hängen jedoch von der Entwicklungsgeschichte ab, innerhalb der bei massigen Bauteilen dem Temperaturverlauf nach dem Betonieren besondere Bedeutung zukommt. Die infolge exothermer Reaktionen bei der Hydratation frei werdende Wärme kann aufgrund thermischer Ausdehnung bleibende Verformungen des noch wenig festen Betons hervorrufen sowie nach der Abkühlung und Kontraktion zur Bildung von Kührissen führen (42). Bei entsprechender großen Temperaturdifferenzen ist ferner mit Gefügespannungen zu rechnen, sofern Zementstein und Zuschlag stark unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Über die Auswirkungen derartiger Gefügespannungen auf den Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag ist jedoch nur sehr wenig bekannt (vgl. (43)).

1.2.2. Wärme- und Feuchtigkeitsleitung

Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Reaktors hat der Beton des Druckbehälters die Temperatur der umgebenden Luft (ca. 20 °C) angenommen. Eine verhältnismäßig dünne Randzone an der Außenfläche wird sich durch Abgabe von Feuchtigkeit an die umgebende Luft angepaßt haben, während die Behälterwand im Inneren den ursprünglichen Gesamtwassergehalt aufweisen wird. Die Innenseite des Behälters ist durch den metallischen Liner abgedichtet, so daß dort Feuchtigkeit nicht verloren werden kann.

Das sich nach der Inbetriebnahme im Behälter aufbauende Temperaturfeld führt zu Veränderungen der ursprünglich nahezu gleichmäßigen Feuchtigkeitsverteilung infolge von Feuchtigkeitsleitung in Richtung des Wärmestromes. Man hat versucht, diese Vorgänge in Versuchen zu simulieren, und zwar mit Hilfe einseitig beheizter Betonbalken unterschiedlicher Größe. Die speziellen Bedingungen, die bei diesen Versuchen vorliegen, werden bedauerlicherweise meist nur pauschal mitgeteilt, auch fehlen häufig die zu weitergehender Interpretation notwendigen Angaben über die Zusammensetzung der Betone. *Brown* (44) zitiert Ergebnisse einer von *Ross* et al. (45) mitgeteilten Untersuchung an einem ca. 1,50 m langen Balken mit einer Temperaturbelastung von 80 °C gegenüber einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Von *Hornby* (46) wird über Feuchtigkeitsprofile berichtet, die an

einem 2,70 m langen Balken gemessen wurden, dessen eine Stirnseite mit einer Temperatur von 150 °C beheizt wurde, während die andere Stirnseite eine Temperatur von 25 °C aufwies.

England und *Ross* (47) geben für Balken mit Längen zwischen 0,6 und 3,1 m, die an der dampfdicht verschlossenen Stirnseite auf Temperaturen von 125 °C erhitzt wurden, Wassergehaltsverteilungen in Abhängigkeit von der Beheizungsdauer an.

McDonald (48) berichtet über Versuche an einem 2,74 m langen Balken aus Beton mit calcitischem Zuschlag (Frischbetonrohichte 2,38 kg/dm³; W/Z-Wert 0,47; Druckfestigkeit nach 28 Tagen rd. 420 kp/cm²). Mit der Beheizung des Balkens, der sich unter Berücksichtigung der tatsächlichen Gestalt eines Behälterabschnittes nach innen verjüngte, wurde im Alter von 17 Monaten begonnen. Da nach 127-tägiger Beheizung mit ca. 65 °C an der heißen Stirnseite merkliche Veränderungen der Feuchtigkeitsverteilung lediglich an der freien Stirnseite festzustellen waren, vermutet *McDonald*, daß bei diesem Temperaturgefälle (44 °C/2,74 m) und den übrigen Parametern mit einer Beeinträchtigung der Betoneigenschaften nicht zu rechnen sei.

Die in der Betonwand zu erwartenden Veränderungen der Feuchtigkeitsverteilung werden von *Wauke* (41) unter Bezug auf den üblicherweise verwendeten Diffusionsansatz (erstes Fick'sches Gesetz)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \text{div} (k \cdot \text{grad } f) \quad (\text{Gl. / 1 /})$$

diskutiert (vgl. (49)), der für den quellen- und senkenfreien Diffusionsstrom gilt. Dabei sind (*f*) der Feuchtigkeitsgehalt, (*t*) die Zeit und (*k*) der Diffusionskoeffizient (Feuchtigkeitsleitfähigkeit). Mit dem Diffusionsansatz kann den tatsächlichen Verhältnissen nur bedingt Rechnung getragen werden, da sich die "inneren Trocknungsbedingungen", die durch die Feuchtigkeitsleitfähigkeit erfaßt werden sollen, ständig ändern. Zwar wurden verschiedene Ansätze für die Abhängigkeit der Feuchtigkeitsleitfähigkeit vorgeschlagen (29), *Wauke* kommt jedoch zu dem Schluß, daß bei allen Untersuchungen die Temperaturabhängigkeit außer Acht gelassen worden sei und überdies entsprechende experimentelle Untersuchungen fehlen. Bei der von *Bazant* (50) durchgeführten Studie habe sich gezeigt, daß notwendigerweise der Porenstruktur entscheidende Bedeutung zukomme. Unter praktischen Verhältnissen ist anzunehmen (41), daß an der Außenseite eine schmale Randzone austrocknet, in der sich die Bedingungen danach nicht mehr wesentlich verändern. Dagegen ist in den feuchten Kernbereichen infolge der starken Temperaturabhängigkeit der Feuchtigkeitsleitfähigkeit mit Veränderungen des Feuchtigkeitsprofils zu rechnen, die Einfluß auf die zeitliche Entwicklung der örtlichen Temperaturleitfähig-

keit gewinnen könnten.

Demnach sind in Übereinstimmung mit den Angaben der voranstehend zitierten Autoren (44 - 47) kurzfristig Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes an der (freien) Außenseite sowie im Bereich der beheizten Innenseite des Behälters zu erwarten. Erst nach langer Zeit ist auch mit sehr langsam zunehmenden Verlusten innerhalb des feuchten Kernes zu rechnen. Mit den zur Verfügung stehenden mathematischen Ansätzen kann der zeitliche Ablauf des Trocknungsvorgangs nicht vorausbestimmt werden, weil die notwendigen Stoffkenngrößen nicht zur Verfügung stehen.

1.2.3 Technologische Eigenschaften

Die vorgenannten Untersuchungen (44 - 48) erstrecken sich auf spezielle, für die konstruktiven Berechnungen unmittelbar benötigte Kennwerte. Mit den stofflichen, vor allem die Porenstruktur betreffenden Veränderungen verursachen die thermisch-hygrischen Vorgänge Verformungen infolge Schwinden/Quellen und thermischer Ausdehnung. Ferner ist bei Verminderung des Feuchtigkeitsgehaltes mit einer unmittelbaren Beeinträchtigung der Wärmeleitfähigkeit zu rechnen. Die thermischen Einflüsse auf das Kriechen sowie auf die Festigkeitseigenschaften und das elastische Verhalten des Betons mögen in diesem Zusammenhang lediglich erwähnt sein.

Im Hinblick auf die Schwindvorgänge berichten R o s s und P a r k i n s o n (51) von Versuchen an ca. 1,50 m langen Betonkörpern aus Kiesbeton mit einem W/Z-Wert von 0,6, die nach dreijähriger Beheizung (Heizbeginn im Alter von 139 Tagen) an der auf 80 °C erhitzten Stirnseite ein Schwindmaß von etwa 300 µm/m an der freien Stirnseite (23,8 °C) von etwa 150 µm/m aufwiesen, während der feucht gebliebene Kern weitgehend dehnungsfrei blieb. Nach (44) ist aufgrund von Untersuchungen, die in (45) mitgeteilt werden, ein Schwindmaß von etwa 400 µm/m für den Beton an der auf 80 °C erhitzten Stirnseite zu erwarten. In (41) wird ausgeführt, daß diese verhältnismäßig hohen Werte nicht allein durch Austrocknungsvorgänge verursacht sein können, sondern vermutlich auch auf die Zersetzung von Hydratationsprodukten bei Temperaturen oberhalb von etwa 60 °C zurückzuführen sind.

Nach der mechanischen Wärmetheorie (vgl. (52)) sind für die Wärmekapazität, die Wärmeleitung und die thermische Ausdehnung eines Stoffes molekularkinetische Vorgänge verantwortlich. Als Ursache für die thermische Ausdehnung von Festkörpern wird die bei Temperaturerhöhung zunehmende Bewegungsenergie der in den Raumgittern schwingenden Moleküle bzw. Atome angesehen, d.h. das thermische Ausdehnungsverhalten hängt in erster Linie von Natur

und Gefüge der Stoffe ab. Im Falle des Betons treten neben dieser Art von Ausdehnung Volumenänderungen auf, die mit hygrischen Vorgängen in Zusammenhang stehen. Nach P i l n y (53) treten Längenänderungen auf, wenn z.B. aufgrund von Änderungen des hygroskopischen Gleichgewichtes Wasser aus den großen Poren in den Gelporen kondensiert.

D'e t t l i n g (54) unterscheidet in einer grundlegenden Arbeit über die Wärmedehnung des Zementsteines, der Gesteine und der Betone die "wahre Wärmedehnung", die als Überlagerung der thermischen Ausdehnung mit mechanischen Dehnungen gemessen wird und die "scheinbare Wärmedehnung, die als nicht zu verhindernde Folge bei Temperaturänderungen aufgrund von Feuchtigkeitsumlagerungen auftritt. Zementstein zeigt demnach im trockenen und wassergesättigten Zustand nur wenig voneinander abweichende Ausdehnungskoeffizienten in der Größenordnung von $\alpha = 10,0 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Demgegenüber ergeben sich bei Feuchtigkeitsgehalten, die je nach Alter zwischen 70 und 45% liegen, infolge des Beitrages der scheinbaren Wärmedehnung maximale Ausdehnungskoeffizienten zwischen 21 bis $23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

D e t t l i n g , der umfangreiches Datenmaterial verschiedener Autoren (z.B. (55)) ausgewertet hat, gibt Beziehungen zur Berechnung der linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Betone an, in denen der beherrschende Einfluß des Zuschlages auf das Ausdehnungsverhalten zum Ausdruck kommt (56) :

$$\alpha = (\alpha_{ze} - \alpha_z) \cdot C (b) + \alpha_z \quad (\text{Gl. / 2 /)}$$

Dabei bedeuten: α_{ze} - Ausdehnungskoeffizient des Zementsteins in Abhängigkeit von Feuchtigkeitsgehalt, Alter und Temperatur; α_z - Ausdehnungskoeffizient des Zuschlages, ggf. in Abhängigkeit von der Temperatur; der Faktor C (b) berücksichtigt die Betonzusammensetzung. Für Temperaturen zwischen 20 und 80 °C ist die Abhängigkeit der Ausdehnungskoeffizienten der Betone von der Temperatur gering und könnte allenfalls bei Verwendung von Kalkstein als Zuschlag einen merklichen Einfluß liefern (57).

Im Hinblick auf den sich im Beton bei Temperaturerhöhung einstellenden Eigenspannungszustand wird ausgeführt (58), daß von dem Dehnungsbetrag um den der thermische Ausdehnungskoeffizient des Zementsteins jenen des Zuschlages übersteigt, ein erheblicher Teil verhindert wird. Die sich daraus ergebenden Gefügespannungen dürften zu plastischen Verformungen des Zementsteines führen. Zu der Frage, inwieweit dies mit Folgen für die Porenstruktur des Zementsteines und z.B. auch für die mechanischen Eigenschaften des Betons in Abhängigkeit vom jeweiligen Reifezustand verbunden ist, konnten der Literatur keine Angaben entnommen werden.

K r i s c h e r (59) hat die Zusammenhänge zwischen "Wärme- und Stofftransport" in porösen Stoffen für Temperaturen bis etwa 100 °C theoretisch behandelt. Demnach sind neben der Wärmeleitfähigkeit der Feststoffbestandteile der Feuchtigkeitsgehalt und die Temperatur von entscheidendem Einfluß, da bei Dampfdiffusionsvorgängen beachtliche Wärmemengen befördert werden können. C a m m e r e r (60) führt in diesem Zusammenhang aus, daß die theoretischen Grundlagen zwar weitgehend erarbeitet wären, daß aber noch viele praktische Meßwerte fehlten.

Die von R i e c h e (41) mitgeteilte Übersicht zur Wärmeleitfähigkeit von Schwerbeton, die die Untersuchungen der verschiedensten Autoren berücksichtigt, enthält zwar eine Vielzahl von Werten, jedoch weichen diese teilweise erheblich voneinander ab und berücksichtigen den Einfluß von Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur nicht oder nur ungenügend. Dies dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, daß die üblicherweise verwendeten sogenannten stationären Meßverfahren für die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit bei veränderlichen Feuchtigkeitsgehalten und veränderlicher Temperatur nicht geeignet sind.

Im Hinblick auf die Wärmeleitung der Feststoffbestandteile des erhärteten Betons sind nach M i s s e n a r d (61) in erster Linie die Zementart sowie der Zementgehalt, der mineralische Aufbau des Zuschlags und die Verdichtung des Frischbetons von Bedeutung. Nach M a r é c h a l (62) wird durch Form und Anordnung der Zuschlagkörner die Wärmeleitfähigkeit von Beton u. U. mehr beeinflußt als durch die "Eigenleitfähigkeit" des Gesteins. Mit Hilfe eines theoretischen Modells hat H a r m a t h y (63) die Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur für verschiedene Betonzusammensetzungen berechnet. Danach ergibt sich für 85 Gew.-% Quarzzuschlag im Beton $\lambda \approx 2,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ und für etwa den gleichen Anteil Feldspatzuschlag $\lambda \approx 1,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (vgl. auch (41)). Dies mag die aufgrund unterschiedlicher Zusätze zu erwartenden Grenzwerte deutlich machen.

R i e c h e führt in (41) zusammenfassend aus, daß für Beton in feuchtem Zustand bei Temperaturen oberhalb von 60 °C mit einer erheblichen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit (40 bis 50% gegenüber dem trockenen Zustand) gerechnet werden müsse. Bei massigen Bauteilen sei mit nur sehr langsamer Austrocknung und entsprechend langsamer Änderung der Wärmeleitfähigkeit zu rechnen. Für die Berechnung von Temperaturfeldern werden als Grenzwerte

$$1,3 < \lambda < 3,5 \quad (\text{W/m}\cdot\text{K})$$

angegeben.

1.3. Aufgabenstellung

Die wichtigsten Zusammenhänge bei der Bildung von Zementstein sind zwar bekannt, jedoch ist der für die Bindung des Wassers und die technologischen Eigenschaften maßgebliche Porenraum noch nicht zufriedenstellend gekennzeichnet. Insbesondere fehlen Angaben über die tatsächlichen Porenformen sowie über die räumliche Anordnung und Verteilung der Poren. Ebenso wird über den Einfluß der Zuschläge auf den Porenraum von Mörteln und Betonen im Schrifttum nur wenig mitgeteilt.

Die inneren, grenzflächenenergetischen Kräfte hängen von den Eigenschaften des Porenraumes sowie von dem Benetzungsverhalten des in ihm befindlichen Wassers ab. Durch Veränderung der äußeren Bedingungen wird das thermisch-hygrische Gleichgewicht gestört. Die Einwirkung von Temperatur ist von unmittelbarem Einfluß auf die Entwicklungsvorgänge und verursacht vermutlich bei Temperaturen oberhalb von ca. 60 °C bereits Strukturveränderungen des Zementsteins.

Über die Untersuchung der Feuchtigkeitsleitung in massigen Bauteilen unter Temperaturbelastung liegen Ergebnisse vor, die qualitative Schlüsse zulassen. Danach ist kurzfristig mit Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes an der freien Außenseite und an der beheizten Innenseite zu rechnen. Die Feuchtigkeitsverteilung im Kern wird sich dagegen erst im Verlaufe mehrjähriger Beheizung langsam ändern.

Je nach Art des Betons sind im Bereich der beheizten und weitgehend ausgetrockneten Innenseite Schwindmaße in der Größenordnung von 400 $\mu\text{m/m}$ zu erwarten. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Betone sind nicht nur stark von der Art der verwendeten Zuschläge sondern auch vom Feuchtigkeitsgehalt abhängig und können bei Kenntnis des Ausdehnungsverhaltens von Zementstein und Zuschlag vorausberechnet werden. Bei Temperaturen unterhalb von 100 °C ist die Wärmeleitfähigkeit in hohem Maße vom Feuchtigkeitsgehalt und von der Temperatur abhängig. Obwohl die theoretischen Zusammenhänge weitgehend geklärt sind, fehlen praktische Meßwerte, bzw. die in der Literatur verfügbaren Daten weichen stark voneinander ab.

Die dem Schrifttum zu entnehmenden Angaben über die Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in massigen Bauteilen unter Einwirkung von Temperatur sind nur lückenhaft und reichen für die Darstellung der Entwicklungsvorgänge nicht aus. Dies trifft in gleicher Weise für die durch Veränderung der thermisch-hygrischen Bedingungen betroffenen technologischen Eigenschaften zu. Um quantitative Aufschlüsse zu ermöglichen, war es daher erforderlich, die Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton bei Variation der maßgeblichen Parameter eingehend zu untersuchen und experimentell abzusichern. Gleichzeitig wa-

ren die für die technologischen Eigenschaften bestimmenden stofflichen Veränderungen zu erfassen und mit den Vorgängen in der Bindemittelmatrix in Beziehung zu setzen.

- 2. Eigene Untersuchungen
- 2.1. Versuchsmaterialien und Versuchsprogramm
- 2.1.1. Versuchsmaterialien
- 2.1.1.1. Betonausgangsstoffe

Zu den Untersuchungen der Wärme- und Feuchtigkeitsleitung sollten - soweit durchführbar - die gleichen Betone herangezogen werden wie bei den an anderer Stelle laufenden Parallelprogrammen des SBB-Förderungsvorhabens (8). Danach waren zwei Betonarten zu untersuchen, die sich im wesentlichen in der Art der Zuschläge unterschieden, wobei es sich zum einen um gebrochenen Kalkstein zum anderen um Sand und Kies handelte. Die Zuschläge und der Zement wurden gemeinsam mit der Firma Fried. Krupp GmbH Universalbau in Essen aus den gleichen Vorkommen bzw. Produktionen bezogen, um durch Verwendung von Stoffen, die zur selben Zeit unter denselben Bedingungen gewonnen bzw. hergestellt wurden, die Vergleichbarkeit von Ergebnissen sicherzustellen.

Das nachfolgend als calcitischer Zuschlag (entsprechend calcitischer Beton usw.) bezeichnete gebrochene Kalksteinmaterial wurde von den Rheinischen Kalksteinwerken aus Wülfrath geliefert, und zwar in den Korngruppen 0/2, 2/5, 5/8, 8/12 und 12/16 (die Klassifizierung entspricht den Quadratloch-Korngruppen gemäß "Merkblatt für Körnungen aus gebrochenem Naturstein (Felsgestein)" der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V.). Es wurde bei 105 °C getrocknet und durch Siebung in 8 Korngruppen sowie 3 Ausfallkörnungen aufgeteilt. Das aus den Gruppen für die Herstellung der "calcitischen" Betone (Balken 1, 2, 3) zusammengestellte Zuschlaggemisch entsprach der in Bild 1 oben wiedergegebenen Sieblinie gemäß DIN 1045 (1). In der Sieblinie ist das nach Rezeptur beizumischende Kalksteinmehl enthalten, das ebenfalls aus Wülfrath bezogen wurde und dessen Kornaufbau aus Tabelle 1 zu entnehmen ist.

Das ungebrochene, zum großen Teil aus Quarz bzw. Körnern mit hohem Quarzanteil bestehende, nachfolgend als Kiessand-Zuschlag (entsprechend Kiessand-Beton usw.) bezeichnete, überwiegend rundkörnige bis plattige Material stammte von der Firma Heinrich Elskens AG in Duisburg, trug die Herstellerbezeichnung "Schifferstraße" und wurde in den Korngruppen 0/3, 3/15, 7/15 u. 15/30 (Klassifizierung entspr. DIN 1045; Fassung Juli 1952) angeliefert. Nach der Trocknung bei

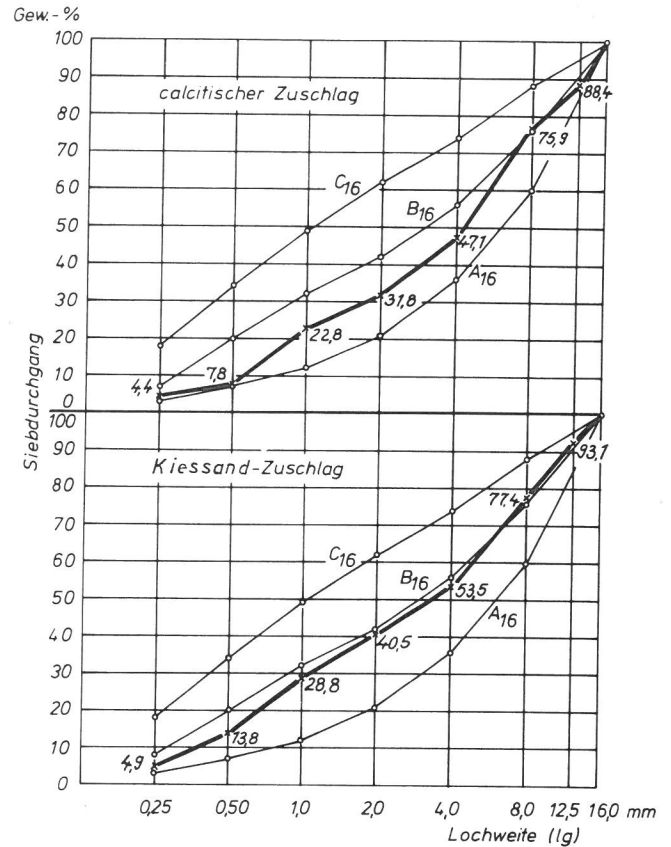


Bild 1
Sieblinien des zur Herstellung der Betone für die Balken 1, 2, 3 bzw. 4, 5, 6 verwendeten calcitischen bzw. Kiessand-Zuschlages mit einem Größtkorn von 16,0 mm; Lochweiten und Sieblinienbereiche entsprechen DIN 1045

105 °C wurde das Material durch Siebung in 6 Korngruppen und eine Ausfallkörnung aufgeteilt. Das aus diesen Korngruppen für die Betone mit "Kiessand-Zuschlag" (Balken 4, 5, 6) zusammengestellte Gemisch entsprach der in Bild 1 unten nach DIN 1045 (1) dargestellten Sieblinie, in der das entsprechend der Rezepturen für die Herstellung des Betons zu verwendende Quarzmehl enthalten ist. Das Quarzmehl wurde von den Westdeutschen Quarzwerken Dr. Müller GmbH in Dorsten bezogen (Herstellerbezeichnung "Silicit") und zeigte den in Tabelle 1 aufgeführten Kornaufbau.

Tabelle 1
Kornaufbau der verwendeten Gesteinsmehle

Gesteinsmehl	Anteil in Gew.-% der Korngruppen [†])			
	0/50	50/100	100/250	> 250
	µm			
Kalksteinmehl	64,4	26,2	9,0	0,4
Quarzmehl	31,8	27,0	32,4	8,8

[†]) Prüfsiebe nach DIN 4188 (4)

Als Bindemittel war ein Portlandzement mit hoher Anfangsfestigkeit der Festigkeitsklasse PZ 450 F DIN 1164 zu verwenden (3). Der in Säcken angelieferte Zement stammte von den Dyckerhoff Zementwerken AG in Neubeckum und trug die Werksbezeichnung "Mark II". Die Untersuchungen an Stichproben (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) des Zementes zur Charakterisierung seiner Eigenschaften ergaben folgende Kennwerte:

Zusammensetzung, DIN 1164 Bl. 3 (3)

Entspricht den Anforderungen;
vgl. Tabelle 2 .

Mahlfeinheit, DIN 1164 Bl. 4

Rückstand auf dem Prüfsiebgewebe
0,2 DIN 4188 0,4 Gew.-%

spezifische Oberfläche nach dem Luftdurchlässigkeitsverfahren 3470 cm²/g

Erstarren, DIN 1164 Bl. 5

Erstarrungsbeginn gemessen mit dem Nadelgerät 97 min

Raumbeständigkeit, DIN 1164 Bl. 6

Die Ergebnisse des Kochversuches entsprachen den Anforderungen.

Festigkeit, DIN 1164 Bl. 7

Die Anforderungen der Festigkeitsklasse 450 F wurden erfüllt (vgl. Abschnitt 2.4.2.2).

Druckfestigkeit nach 28 Tagen
i. M. 50,5 N/mm²

Hydratationswärme, DIN 1164 Bl. 8

273 J/g
($\hat{=}$ 65 cal/g)

Die Wärmeentwicklung des Portlandzementes mit höherer Anfangsfestigkeit gegenüber der eines Hochofenzementes mit langsamer Anfangserhärtung veranschaulicht Bild 2 anhand von Temperaturmessungen in einem mit Polystyrolschaum gedämmten Glasgefäß, das jeweils 160 g Purpaste mit einem W/Z-Wert von 0,4 enthält.

Dichte 3,10 g/cm³
ermittelt nach (64)

2.1.1.2. Betone

Die Betonzusammensetzungen waren auf die von der Firma Fried. Krupp GmbH Universalbau (8) verwendeten Rezepturen soweit möglich abzustimmen. Eine völlige Übereinstimmung in den Eigenschaften der Betone hätte a priori auch bei gleichen Ausgangsstoffen aufgrund von Inhomogenitäten der Zuschläge, unterschiedlicher Herstellungs- und Verarbeitungsbedingungen usw. nicht erzielt werden können.

Wie aus Tabelle 3 zu entnehmen ist, wurden für die beiden hinsichtlich des Zuschlages unterschiedlichen Betonarten je 3 verschiedene Mischungen für die Balken 1, 2, 3 bzw. 4, 5, 6 hergestellt. Hierzu mußten zunächst die Zusammensetzungen für die Betone 2 und 5 anhand von

Tabelle 2
Chemische Analyse des Zementes

Bestandteile	*)	[Gew.-%]	glühverlustfrei [Gew.-%]
Glühverlust, 1000 °C darin enthalten Kohlendioxid	CO ₂	2,59 2,10	
unlöslicher Rückstand		1,36	1,40
Siliciumdioxid	SiO ₂	19,08	19,59
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	5,29	5,43
Eisenoxid	Fe ₂ O ₃	2,06	2,11
Titandioxid	TiO ₂	0,03	0,03
Manganoxid	Mn ₂ O ₃	0,52	0,53
Calciumoxid	CaO	63,39	65,08
Magnesiumoxid	MgO	1,03	1,06
Kaliumoxid	K ₂ O	0,90	0,92
Natriumoxid	Na ₂ O	0,13	0,13
Sulfat	SO ₃	3,22	3,31
entsprechend Calciumsulfat	CaSO ₄	5,47	5,63
Chlorid	Cl ⁻	<0,01	<0,01
Rest (nicht bestimmt)		0,39	0,40
Summe		100,00	100,00
<u>glühverlustfrei [Gew.-%]</u>			
potentielle	C ₂ S	66,4	
Phasenzusammen-	C ₂ S	6,1	
setzung:	C ₃ A	9,9	
	C ₄ AF	8,0	
$\text{kalkstandard} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,80 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3} = 99,7$			
$\text{Tonerdemodul} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 2,1$			
$\text{Silikatmodul} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 2,4$			

*) Probenvorbereitung, Analyse und Berechnung nach (65)

Eignungsversuchen bei vorgegebenem Zuschlagsgemisch festgelegt werden. Bei annähernd gleichem W/Z-Wert und unterschiedlichem Zementgehalt lagen insbesondere aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Zuschläge die Verdichtungsmaße nach Walz im Falle des Balkens 2 an der Grenze zwischen den Konsistenzbereichen K 1 und K 2 nach DIN 1045 (1) und im Falle des Balkens 5 an der Grenze zwischen den Konsistenzbereichen K 2 und K 3. Beide Betone waren gut verarbeitbar und erreichten im Alter von 28 Tagen die in Tabelle 3 angegebenen Druckfestigkeiten (Würfel mit 20 cm Kantenlänge). Von den Mischungen für die Balken 2 und 5 ausgehend wurden die Zusammensetzungen für die Balken 1 und 4 durch Erniedrigung und für die Balken 3 und 6 durch Erhöhung des W/Z-Wertes erhalten. Wie sich an dem Verdichtungsmaß von 1,40 für den Balken 1 erkennen läßt, war diese Mischung nahe an der Grenze der praktischen Verarbeitbarkeit. Die Verdichtungsmaße der Mischungen für die Balken 3 und 6 lagen mit 1,14 bzw. 1,10 etwa am Übergang zwischen den Konsistenzbereichen K 2 und K 3. Im Hinblick auf das Seditimentieren des Frischbetons beim Betonieren wäre insbesondere bei Balken 6 eine höhere Wassergabe nicht infrage gekommen.

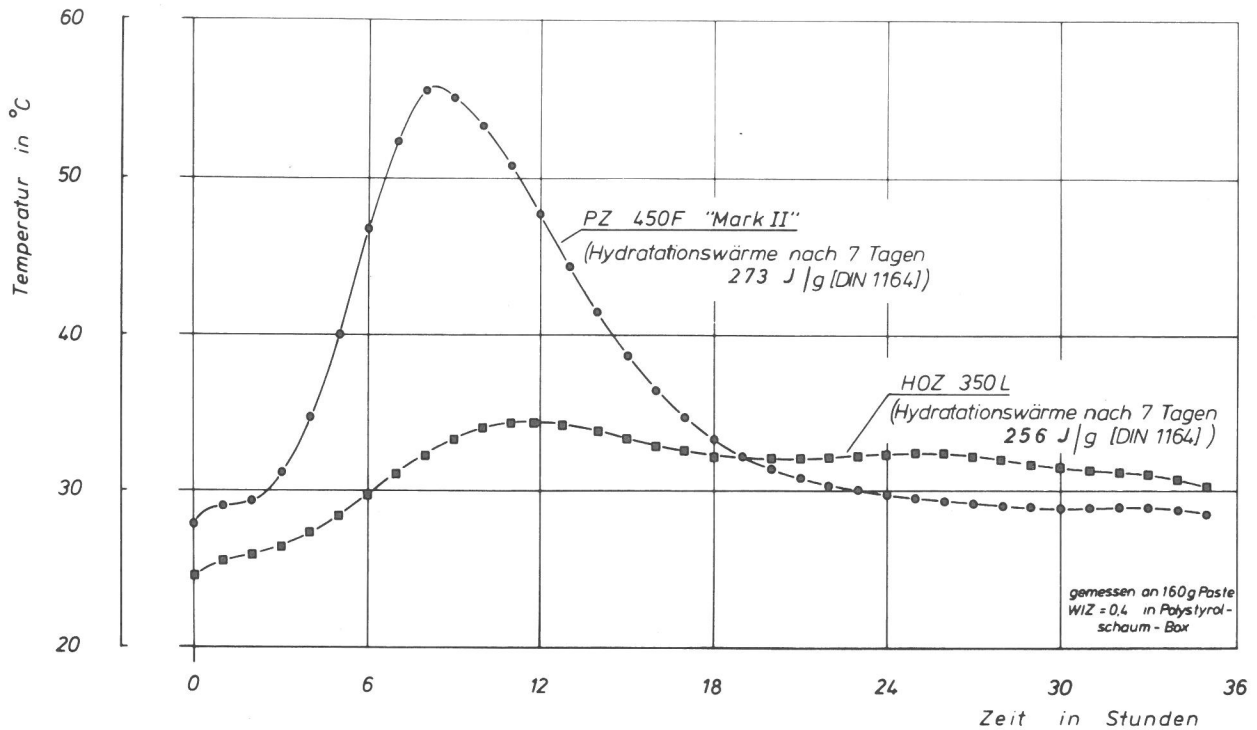


Bild 2
Temperaturentwicklung des Portlandzementes PZ 450 F "Mark II" im Vergleich zu einem Hochofenzement HOZ 350 L; gemessen in einem Glasgefäß mit allseitiger Wärmedämmung an jeweils 160 g Purpaste mit einem Wasser/Zement-Wert von 0,4

Tabelle 3
Kenndaten der Frischbetone mit calcitischem Zuschlag (Balken 1, 2, 3) und Kiessand-Zuschlag (Balken 4, 5, 6)

	Beton mit calcitischem Zuschlag Balken Nr.			Beton mit Kiessand-Zuschlag Balken Nr.		
	1	2	3	4	5	6
Zuschlag kg/m^3	1928	1903	1878	1927	1906	1892
Zement (PZ 450 F) kg/m^3	341	337	333	305	301	299
W/Z-Wert	0,50	0,565	0,63	0,52	0,575	0,63
Verdichtungsmaß nach Walz	1,40	1,27	1,14	1,22	1,11	1,10
Luftporengehalt Vol.-%	1,3	1,3	1,5	2,3	2,2	2,6
Frischbetonroh-dichte kg/dm^3 +)	2,44	2,43	2,42	2,39	2,38	2,38
Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen (Lagerung nach DIN 1048) N/mm^2	52,5	46,0	39,8	51,2	49,5	43,0

+) Mittelwerte von Würfeln mit 20 cm Kantenlänge

Da der Vorhabenumfang nicht beliebig erweitert werden konnte, mußten die Untersuchungen auf die Variation des für die Bildung des Porenraumes wichtigen Parameters Wasser/Zement-Wert beschränkt bleiben. Die Zusammensetzung der Betone für die Balken 2 und 5 wurde der praktischen Forderung nach guter Verarbeitbarkeit bei niedrigem Wassergehalt angepaßt. Unter dem Gesichtspunkt der Verarbeitbarkeit wären größere Abstufungen der W/Z-Werte nicht zweckmäßig gewesen.

Für die Betonherstellung fand ein 150 l-Zwangsmischer Verwendung. Insgesamt wurden je Balken - einschließlich der Probekörper für die Druckfestigkeitsprüfungen sowie die zugehörigen betontechnologischen Untersuchungen - 5 Mischerchargen folgender Zusammensetzung benötigt:

Beton mit calcitischem Zuschlag

Zuschläge nach Sieblinie Bild 1 (zusammengestellt aus 11 Korngruppen)	205,80 kg
Kalksteinmehl	4,20 kg
Zement	37,20 kg
Wasser (Balken 1	18,60 kg
Balken 2	21,03 kg
Balken 3)	23,42 kg

Beton mit Kiessand-Zuschlag

Zuschläge nach Sieblinie Bild 1 (zusammengestellt aus 7 Korngruppen)	201,60 kg
Quarzmehl	8,40 kg
Zement	33,20 kg
Wasser (Balken 4	17,27 kg
Balken 5	19,10 kg
Balken 6)	20,91 kg

Der Beton für die zylindrischen Probekörper (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) sowie die Bezugskörper für die Aufstellung der Auswertnomogramme (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) usf. wurde nachträglich in weiteren Chargen hergestellt.

Beim Betonieren der Balken wurde der Beton in Schichten von ca. 5 cm Dicke in die von der Dampfsperre gebildete Schalung (vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1) eingebracht und durch Stampfen sowie durch Rütteln mit einem Innenrüttler von 3 cm Dicke verdichtet. Die Menge des in jedem Balken verarbeiteten Frischbetons wurde durch Wägung ermittelt; die Einwaagen dienten auch zur Abschätzung der in Tab. 4 aufgeführten Rohdichten und Gesamtwassergehalte. Die Anfertigung der Probewürfel für die Druckfestigkeitsuntersuchungen sowie für die Versuche zur Ermittlung der betontechnologischen Kennwerte (Tabelle 3) erfolgten nach DIN 1048 (2). Auch bei der

Anfertigung der zylindrischen Probekörper sowie der Bezugskörper usw. wurde in Anlehnung an DIN 1048 verfahren.

2.1.1.3. Matrixmörtel

Aus den Ergebnissen von Vorversuchen war zu schließen, daß die Gefügeentwicklung mit Hilfe von Untersuchungen an Zementstein allein nicht hinreichend charakterisiert werden konnte. Es war vielmehr zu erwarten, daß gerade die Art der verwendeten Zuschläge von Bedeutung für den Porenraum sein würde. Da jedoch aus apparativen Gründen für gewisse Untersuchungen, insbesondere für die der Porengrößenverteilung, nur kleine Proben herangezogen werden können, schied Beton selbst als Versuchsgegenstand aus. Beton hat üblicherweise einen niedrigen Zementsteinanteil, der überdies bei kleinen Proben stark streuen würde. Um sowohl die durch den Zuschlag verursachten Besonderheiten des Porenraumes erfassen zu können, als auch das Probematerial den Erfordernissen der Meßmethode in ausreichender Weise anzupassen, wurden die Untersuchungen zur Gefügeentwicklung an Mörteln durchgeführt. Diese Mörtel entsprachen bis auf die grobe Körnung den Betonen, aus denen sie durch sorgfältiges Absieben des Frischbetons auf einem Rundlochsieb mit einem Lochdurchmesser von 5 mm, das auf einem Rütteltisch aufgespannt war, gewonnen wurden. An den Körnern des Siebrückstandes hafteten feine Bestandteile des Zuschlages. Demnach wurde den ursprünglichen Betonmischungen nur der Anteil an grobem Zuschlag > 5 mm (gemäß der Sieblinien in Bild 1 ca. 30 bis 40% des Zuschlaggewichtes) sowie der von den herausgesiebten Körnern verbrauchte Zementleim entzogen. Der als Siebdurchgang gewonnene Mörtel weist bei praktisch gleichgebliebenem W/Z-Wert andere technologische Kenndaten als die ursprüngliche Betonmischung auf, insbesondere aber ein anderes Zuschlag/Zement-Verhältnis und eine andere Rohdichte (vgl. den unteren Teil der Tabelle 4). Denn durch das Aushalten des Grobkornanteils wurden die geometrischen Verhältnisse der einzelnen Bestandteile zueinander verändert. Die Eigenschaften des Mörtels entsprechen jedoch praktisch denen der Matrix, in die die groben Körner eingebettet sind. Zwecks besserer Unterscheidung von den mit Quarzsand als Zuschlag hergestellten Mörtelmischungen werden die aus den Frischbetonen gewonnenen Mörtel nachfolgend Matrixmörtel genannt.

Die Matrixmörtel wurden nach dem Sieben nochmals durchgemischt und in konische PVC-Formen von 26 cm³ Volumen gefüllt. Die Verdichtung der jeweils 64 zu einem Balken gehörenden Probekörper erfolgte gemeinsam in einer auf dem Rütteltisch befestigten Spannvorrichtung. Nach dem Abstreichen

Tabelle 4

Rohdichten und Gesamtwassergehalte der in den Balken verdichteten Betone sowie der zugehörigen Matrixmörtel

Eigenschaften	Beton mit calcitischem Zuschlag Balken Nr.			Beton mit Kiessand-Zuschlag Balken Nr.		
	1	2	3	4	5	6
	des Balkenbetons					
<u>Trockenrohichte</u> Q_{tr} kg/dm ³ - ermittelt an Proben des Balkenbetons, vgl. Abschnitt 2.2.5 - (Trockenrohichte, abgeschätzt			2,24 s = ± 0,13			2,22 s = ± 0,13
<u>Gesamtwassergehalt</u> (vor Heizbeginn)	kg/dm ³) (2,33)	(2,27)	(2,23)	(2,24)	(2,22)	(2,20)
	Vol.-% 14,4 +)	17,6	19,3	14,9	16,0	17,0
des Matrixmörtels						
<u>Frischrohichte</u> Q_f kg/dm ³ (Frischrohichte des zur Mörtelherstellung verwen- deten Betons	2,34	2,32	2,28	2,32	2,31	2,31
<u>Gesamtwassergehalt</u> ++)	kg/dm ³) (2,48)	(2,45)	(2,43)	(2,41)	(2,41)	(2,39)
(Gesamtwassergehalt des zur Mörtelherstellung verwendeten Betons ++)	Gew.-% 12,8	13,9	14,6	11,6	12,2	13,2
<u>Rohdichte</u> Q kg/dm ³ - Mittelwerte der im Alter von 1 Tag in die Balken eingesetzten Probekörper-	Gew.-%) (7,3)	(8,2)	(9,3)	(7,6)	8,2	(9,3)
	2,36	2,32	2,29	2,31	2,29	2,30

+) unter Berücksichtigung der verhältnismäßig großen Dichtestreuungen
++) ermittelt durch Darren, bezogen auf das Gewicht der getrockneten Probe

und Wiegen lagerten die Probekörper bei 25 °C und annähernd 100% rel. Feuchte bis zum Einsetzen in die an den Balkenoberseiten vorgesehenen Aussparungen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1).

2.1.1.4. Zementmörtel und Zementstein

Von dem in 40 luftdicht verschlossenen Behältern mit jeweils ca. 100 kg lagernden Zement wurden stichprobenartig dreimal 25 kg entnommen. Ferner wurde eine Sammelprobe von 30 kg durch Vermischen von Proben aus allen Behältern zusammengestellt.

Der Zement der Stichproben diente zur Herstellung von Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Zementmörtel entsprechend DIN 1164 Bl. 7 (3), die auch zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Eigenschaften des Zementes herangezogen werden sollten.

Der Zement der Sammelprobe fand bei der Herstellung von Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Zementpaste mit Wasser-Zement-Werten zwischen 0,2 und 0,55 bei einer Abstufung von 0,05 Verwendung, wobei die Probekörper aus Zementpaste bis zum Entformen nach 24 Stunden in An-

lehnung an DIN 1164 Bl. 7 (3) behandelt wurden und im Anschluß daran bis zu den Prüfungen in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung lagerten.

2.1.2. Versuchsbedingungen, aufbau und -durchführung

2.1.2.1. Versuche an den Betonbalken

2.1.2.1.1. Versuchsanordnung

Im Hinblick auf die komplexen Vorgänge bei der Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton erschien es notwendig, Untersuchungen unmittelbar an großvolumigen Betonkörpern durchzuführen und diese - soweit erforderlich - durch Versuche an kleinen Probekörpern zu ergänzen. Beim Entwurf des Versuchsprogrammes wurde von der Voraussetzung ausgegangen, daß eine Betonwand z. B. eines Reaktorbehälters mit einer Wanddicke von 4 bis 5 m auf der einen Seite erhitzt wird, während die andere Seite normaler Raumtemperatur ausgesetzt ist. In Annäherung an die tatsächlichen geometrischen Verhältnisse können zur Untersuchung der Leitung von Wärme und Feuchtigkeit die Vorgänge in einem freigeschnittenen balkenförmigen Element betrachtet

werden, dessen Länge der Wanddicke entspricht und dessen Stirnseiten Teile der Wandflächen darstellen. Bei den nachfolgend beschriebenen Versuchen durfte die Balkenlänge aus technischen Gründen 240 cm nicht überschreiten. Der Balkenquerschnitt wurde mit 40 cm x 40 cm so groß wie möglich festgelegt, um Randeinflüsse, die unter Umständen die Vorgänge beeinträchtigen können, klein zu halten.

Beim Versuchsaufbau für die Betonbalken waren folgende Bedingungen zu berücksichtigen: Die Temperatur des Betons an der beheizten Stirnseite sollte 80 °C betragen und die Temperatur der an der freien Stirnseite vorbeistreichenden Luft ca. 20 °C bei einer relativen Feuchte von rund 45%. Damit in Analogie zu der beheizten Wand Wärme und Feuchtigkeit nur von innen nach außen, also in Richtung der Balkenlängsachse transportiert wurde, war eine Beeinträchtigung der Temperaturverteilung und der Feuchtigkeitsverteilung durch äußere Einflüsse zu verhindern, d.h. es waren vor allem Maßnahmen gegen den Verlust von Wärme und Feuchtigkeit an den Längsseiten der Balken zu treffen.

In Bild 3 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Die gesamte Anordnung befindet sich in einem klimatisierten Raum, in dem eine Lufttemperatur von 20 °C bei ca. 45% rel. Feuchte herrscht. Der Betonbalken ist mit Ausnahme der freien Stirnseite rundum mit einer Dampfsperre

aus zusammengelöteten, 0,2 mm dicken Kupferblechen versehen. Diese Bleche tragen eine Beschichtung aus Epoxidharz, die mit scharfem Quarzsand abgestreut ist, um einen innigen Verbund zwischen Dampfsperre und Beton zu erzielen.

An der linken Stirnseite befindet sich eine an Bolzen geführte und durch Federn angedrückte, gußeiserne, elektrische Heizplatte, die über eine ebenfalls 40 cm x 40 cm große Wärmestrommeßplatte (vgl. Abschnitt 2.2.2) und eine 2 mm dicke Ausgleichsplatte aus Weichkupfer Wärme an den Betonbalken abgibt. Die mit 4 getrennten Heizkreisen (je 1,25 kVA) versehene, ca. 20 kg schwere Heizplatte wird über einen elektronischen Zweipunktregler mittels eines Schützes gesteuert, wobei der Sollwert (80 °C) an der Betonoberfläche thermoelektrisch gemessen wird. Heizsystem und Balken sind von einer 30 cm dicken Wärmedämmung umgeben, deren innerste Schicht aus Polyurethan-Hartschaum besteht, während für die Außenschichten Polystyrol-Schaum verwendet wurde. Um mechanische Beschädigungen der Dampfsperre beim Betonieren zu verhindern, befindet sich zwischen Dampfsperre und Wärmedämmung auf dem Boden sowie an den Längsseiten des Balkens eine 1 mm dicke Schutzlage aus Hart-PVC.

Da trotz des hohen Wärmedurchlaßwiderstandes der verwendeten Dämmstoffe und trotz der Dicke der Dämmung mit Wärmeverlusten über die Längsseiten zu rechnen ist, sind innerhalb der

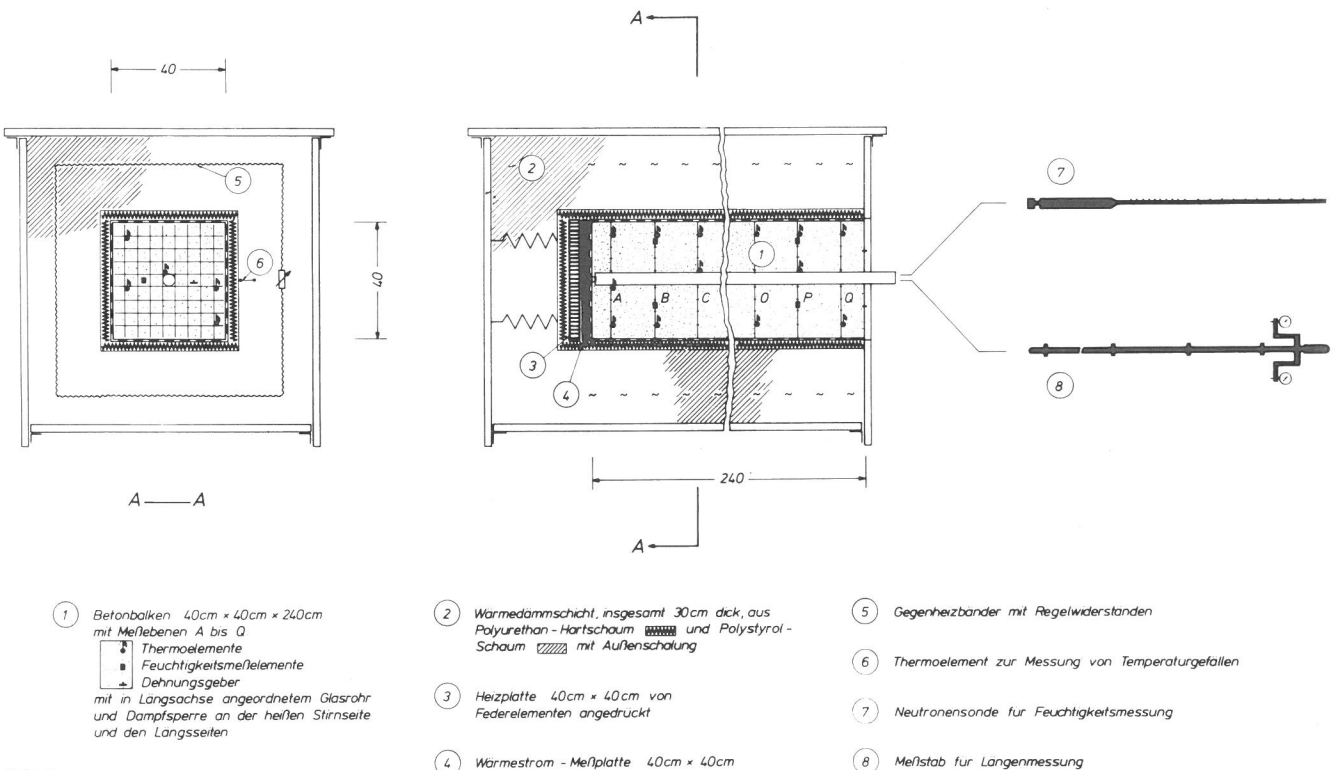


Bild 3

Schematische Darstellung der Anordnung zur Untersuchung der Wärme- und Feuchtigkeitsleitung sowie damit verbundener Betoneigenschaften eines stirnseitig beheizten (80 °C), 240 cm langen Betonbalkens von 40 cm x 40 cm Querschnitt, mit Dampfsperre und Wärmedämmung; Bedingungen an der freien Stirnseite: 20 °C/45 % rel. Feuchte

Dämmschichten, 20 cm von der Betonoberfläche entfernt, den Balken im Querschnitt umfassende elektrische Heizbänder angeordnet. Diese bestehen aus einem mit Glasseide isolierten, 0,5 mm dicken Konstantandraht und sind zwecks besserer Wärmeabgabe in einem 2,5 cm breiten gefalteten Kupferblech verlegt. Ihre Heizleistung kann mit Hilfe regelbarer, an der Balkenaußenschalung angebrachter Widerstände so abgeglichen werden, daß kein Temperaturgefälle zwischen Betonoberfläche und Heizbandebene besteht. Der Abgleich wird thermoelektrisch überwacht und zwar mittels eines zwischen Heizband und Betonoberfläche angeordneten Kupfer-Konstantan-Kupfer-Elementes, dessen Lötstellen 5 cm voneinander entfernt sind und dessen Thermospannungsdifferenz bei gleicher Temperatur im Querschnitt ($d\vartheta/d b = 0$) zu 0 wird.

Die Außenschalung, die den Aufbau vollständig umschließt und nur die freie Stirnseite mit einem Ausschnitt von ca. 41 cm x 41 cm frei läßt, wird von 25 mm dicken, mit Aluminiumfolie beklebten bzw. beidseitig lackierten Schalbrettern gebildet, die an den Längsseiten mit Stahlprofilen versteift sind. Der Deckel der Außenschalung ist abschraubbar und besteht aus 3 Einzelteilen. Als Unterkonstruktion dient ein aus I-Profilen gefertigtes lafettenartiges, 2-achsiges Gestell, an dessen 4 Achsen der gesamte Versuchsaufbau (rd. 1600 kg) zur Wägung angehoben werden kann (vgl. dazu auch Bild 6).

In Bild 4 ist der 240 cm lange Balken ohne Schalung, Wärmedämmung und Dampfsperre abgebildet. Er wird durch "Meßebenen" in 17 Abschnitte unterteilt, die durch die begrenzenden Ebenen $\Theta/A, A/B, \dots$ bis Q/X sowie den zunehmenden Abstand von der beheizten Stirnseite gekennzeichnet sind. Abschnitt Θ/A ist 7 cm, Q/X 8 cm, alle übrigen sind 15 cm dick. Die in den Meßebenen angeordneten Drahtgitter (polyesterbeschichtetes Drahtgeflecht mit 50 mm Maschenweite und 2 mm Drahtdicke) dienen einerseits zur Befestigung der Meßelemente und ihrer Zuleitungen, andererseits zeichnen sie die Bruchebenen beim Spalten der Betonbalken nach Versuchsabschluß (vgl. Abschnitt 2.1) vor. An der Oberseite des Balkens befinden sich 2 "Fenster" in der Dampf-

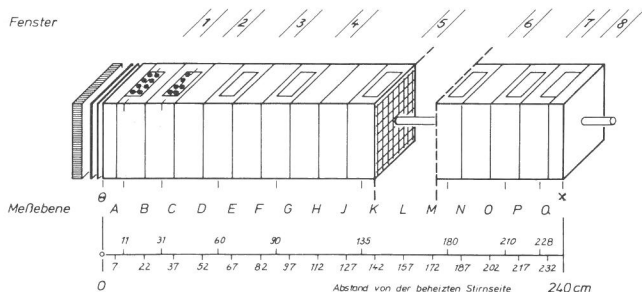
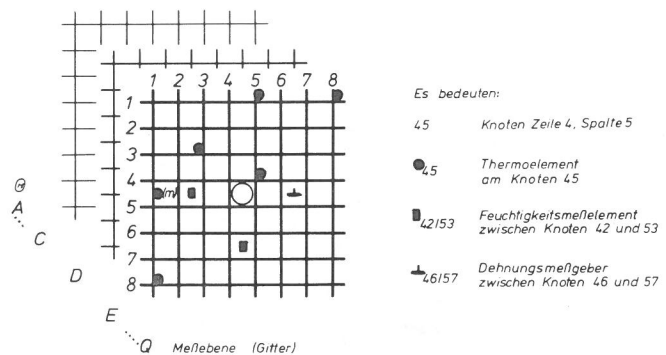


Bild 4 Unterteilung der Betonbalken in Abschnitte durch "Meßebenen" (bezeichnet A bis Q) und Anordnung der "Fenster" (bezeichnet 1 bis 8) auf der Balkenoberseite

sperre und der Wärmedämmung, die nach Entfernung des Schaldeckels den Zugang zu den in konischen Vertiefungen angeordneten jeweils 8 Probekörpern für die Untersuchung der Gefügestruktur am Matrixmörtel (vgl. Abschnitt 3.3) ermöglichen. Die Fenster 1, 2 und 3 sind mit Stahlplatten und zwischen der Stahlplatte und der Dampfsperre eingepreßter Dichtung aus Silikonkautschuk verschlossen. Bei den Fenstern 4 bis 8 ist eine Kupferfolie über die Fensteröffnung auf die Dampfsperre mit beidseitig klebendem, 3 cm breitem Dichtungsband aufgespannt und von der Wärmedämmung angepreßt.

Das in der Balkenlängsachse zentral angeordnete Glasrohr (Innendurchmesser 41 mm, Wanddicke 2,3 mm) ist zur heißen Stirnseite hin geschlossen und nimmt einen mit Schaumstoff umwickelten Holzstab auf, der den Transport von Wärme innerhalb des Rohres durch Konvektion verhindert und zu den in Betracht kommenden Messungen entfernt wird.

Die Anordnung der Meßelemente und Meßeinrichtungen im Balken ist Bild 3 sowie der Aufstellung in Bild 5 zu entnehmen.



Meße-ebene	● Thermoelemente *)		■ Feuchtigkeits- meßelement	▲ Dehnungs- meißgerät
	Anordnung in der Meßebene (Gitter)			
A	11, 15, 18, 33, 44, 51(m), 55, 58(m), 66, 81, 85, 88	42/53	46/57	
B	11, 15, 44, 85, 88	42/53, 64/75 74/25	—	
C	15, 18, 45, 51(m), 81	42/53	46/57	
D	11, 15, 44, 85, 88	42/53	—	
E	15, 18, 33, 45, 51(m), 81	42/53, 64/75 74/25	46/57	
F	11, 15, 44, 85, 88	42/53	—	
G	15, 18, 45, 51(m), 81	42/53	46/57	
H	11, 15, 44, 85, 88	42/53	—	
J	15, 18, 45, 51(m), 81	42/53	46/57	
K	11, 15, 33, 44, 85, 88	42/53, 64/75 74/25	—	
L	15, 18, 45, 51(m), 81	42/53	46/57	
M	11, 15, 44, 85, 88	42/53	—	
N	15, 18, 45, 51(m), 81	42/53	—	
O	11, 15, 44, 85, 88	42/53	46/57	
P	15, 18, 33, 45, 51(m), 81	42/53, 64/75 74/25	—	
Q	11, 15, 44, 85, 88	42/53	46/57	

*) Θ im Balkenursprung 2 Thermoelemente zur Regelung

Bild 5 Anordnung der Thermoelemente, Feuchtigkeitsmeßelemente und Dehnungsgeber in den durch Gitter gebildeten Meßebenen der Betonbalken (Meßebenen A bis Q mit steigendem Abstand von der beheizten Stirnseite)

2.1.2.1.2. Durchführung der Versuche

Entsprechend der Aufgabenstellung war die Fertigung von 6 der in Bild 3 dargestellten Versuchsanordnungen erforderlich. Hiervon dienten jeweils 3 für die Untersuchungen an den Betonen mit calcitischem Zuschlag (Balken 1, 2, 3) und mit Kiessand-Zuschlag (Balken 4, 5, 6), wie bereits in Abschnitt 2.1.1 ausgeführt.

Für das Betonieren war an den später freien ("kalten") Stirnseiten jeweils ein mit einer Holzplatte sowie 2 U-Profilen verstärktes Blech angebracht, das an den Rändern sowie an der Durchführung des Glasrohrs gegen Austritt von Feuchtigkeit abgedichtet war. Ferner war der Versuchsaufbau von oben offen (Bild 6); das mit abgedichteten Fensteröffnungen versehene Oberblech der Dampfsperre wurde auf den verdichteten Beton aufgebracht und an den Rändern abgeschlossen. Die oberen Wärmedämmschichten wurden am 3. Tag nach dem Betonieren aufgelegt und dabei die Gegenheizbänder mit einer Steckverbindung zusammengefügt sowie der Schaldeckel aufgeschraubt.

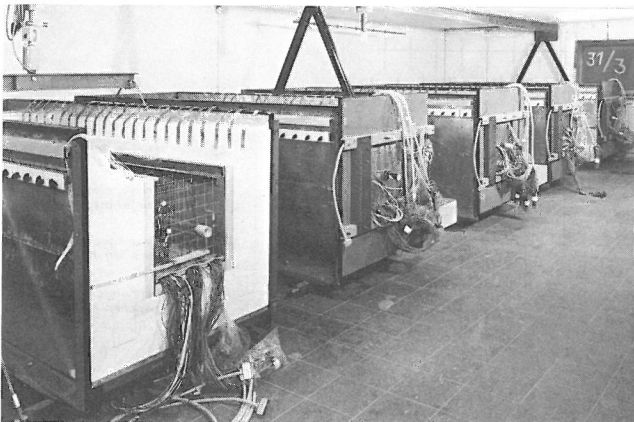


Bild 6
Ansicht der Aufbauten zur Untersuchung der Betonbalken; linker Aufbau oberseitig offen und ohne Stimplatte, mit herausgeführten Meßleitungen und über die Seitenwand gelegten Heizbändern

Das Betonieren der einzelnen Balken sowie der zugehörigen Probekörper erfolgte in Abständen von jeweils einer Woche. Aus arbeitstechnischen Gründen mußte zwischen der Herstellung der Balken 1, 2, 3 und 4, 5, 6 eine Pause von rd. 2 Monaten eingelegt werden. Insofern unterscheiden sich die erreichten Betonalter.

Bis zum 28. Tag nach dem Betonieren konnten die Balken infolge der allseitig dichtenden Dampfsperre sowie des Bleches an der Stirnseite keine Feuchtigkeit an die die Versuchsanordnung umströmende Luft abgeben. Am 28. Tag wurde die ("kalte") Stirnseite freigelegt und mit der Beheizung begonnen. Die Regelung der Heizbänder anhand der Temperaturdifferenzmessungen in der Wärmedämmung erfolgte zunächst in Abständen von 12 Stunden, später von 24 Stunden und konnte, da nur gering-

fügige Änderungen auftraten, nach etwa 35-tägiger Beheizung in mehrtägigem Abstand vorgenommen werden.

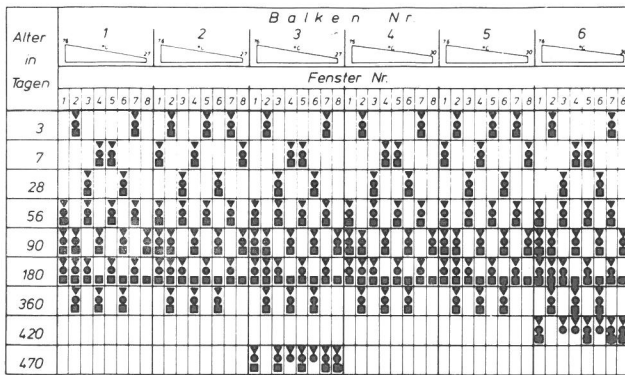
Im Hinblick auf die äußeren Versuchsbedingungen sind bei den Messungen an den Balken demnach zwei Abschnitte zu unterscheiden, nämlich der Zeitabschnitt bis zum Heizbeginn am 28. Tag und der nachfolgende durch die Beheizung gekennzeichnete Zeitraum. Aus verschiedenen Gründen konnte nicht mit allen Messungen unmittelbar nach dem Betonieren begonnen werden. Über Einzelheiten zu den angewendeten Meßverfahren sowie zur Durchführung der Messungen wird in Abschnitt 2.2 berichtet.

2.1.2.2. Versuche an Probekörpern

- Probekörper aus Matrixmörtel -
Da der Balkenbeton während der Versuchsdauer zur direkten Untersuchung der Gefügeentwicklung wie auch anderer Eigenschaften nicht herangezogen werden konnte, mußten Untersuchungen an gesondert hergestellten Probekörpern durchgeführt werden.

Der für die Untersuchungen auf Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser, Gesamtporosität und Porengrößenverteilung (vgl. Abschnitte 2.3.1 bis 2.3.3) vorgesehene Matrixmörtel wurde - wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erwähnt - aus den Frischbetonen der Balken durch Absieben mit einem Rundlochsieb ϕ 5 mm gewonnen. Der in die konischen PVC-Formen eingebrachte Mörtel wurde nach ca. 20-stündiger Lagerung bei 25 °C und annähernd 100% rel. Feuchte entformt und in die über die Fenster zugänglichen, als Negativ der Probekörper passenden Vertiefungen eingebracht, wobei die Probekörper an den Mantelflächen Kontakt zum umgebenden Beton hatten und nur an den Oberflächen ein etwa 1 bis 2 mm breiter Luftspalt bestand. Die Probekörper des Matrixmörtels unterlagen damit annähernd den im Balkenbeton herrschenden Bedingungen, die durch die jeweilige lokale Temperatur und durch den mit dem umgebenden Beton im Gleichgewicht stehenden Feuchtigkeitsgehalt gekennzeichnet sind. Gemäß dem in Bild 7 wiedergegebenen Plan wurden die Probekörper aus den Fenstern 1 bis 8 im allgemeinen paarweise entnommen, gewogen, aufbereitet und untersucht. Dieser Versuchsplan gibt ohne Berücksichtigung der Probenanzahl für die Fenster eines Balkens und die einzelnen Altersstufen die Art der jeweils durchgeführten Untersuchungen an.

- Betonwürfel -
Die Festigkeitsentwicklung ist ein Abbild der Erhärtungsvorgänge im Zementstein. Daher ermöglichen z.B. Druckfestigkeitsuntersuchungen auch Aussagen über die Gefügeentwicklung (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die bei den Balkenversuchen in-



Zur Untersuchung

- der Porenradialverteilung
- ▼ des verdampfenden und nicht verdampfenden Wassers
- der Roh- und Reindichte

Bild 7

Zuordnung von Entnahmestelle (Fenster 1 bis 8), Altersstufe (3 bis 470 Tage) und Art der durchgeführten Untersuchung der in den Balken 1 bis 6 angeordneten Probekörper aus Matrixmörtel

folge der Temperaturbelastung vorgegebenen Bedingungen könnten jedoch bei der Lagerung einer größeren Anzahl von Probewürfeln nur unzureichend nachgeahmt werden, da sich definierte, zeitlich veränderliche Temperatur- und Feuchtigkeitszustände nur mit erheblichem Aufwand einhalten ließen. Abgesehen davon lassen sich auch bei den vorliegenden Untersuchungen die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Probewürfeln nur zu Vergleichen mit der tatsächlichen Festigkeit des Balkenbetons heranziehen. Weitergehende Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Balkenbetons sind aber aufgrund unterschiedlicher Herstellungs- und Erhärtungsbedingungen nur in Grenzen möglich. Aus diesen Gründen wurden von vornherein als Bedingungen nur die Lagerung bei 20 °C und annähernd 100% rel. Feuchte sowie bei 20 °C und 45% rel. Feuchte vorgesehen, wobei in beiden Fällen die Probekörper bis zum Alter von 7 Tagen entsprechend DIN 1048 (2) behandelt wurden.

Je Balken, d.h. je Betonsorte, wurden für die Druckfestigkeitsprüfungen bei der Herstellung des Betons 12 Sätze zu 3 Würfeln mit 10 cm und 6 Sätze Würfel mit 20 cm Kantenlänge angefertigt (insgesamt 54 Würfel pro Balken). Von den Würfeln mit 10 cm Kantenlänge wurde je ein Satz im Alter von 3 sowie 7 Tagen geprüft. Außerdem wurde von je 5 Sätzen pro Lagerungsart je ein Satz zur Prüfung am 28., 90., 180. und 360. Tag und zum Versuchsabschluß vorgesehen. Von je 3 Sätzen pro Lagerungsart der Würfel mit 10 cm Kantenlänge sollte je ein Satz am 28., am 180. Tag und zu Versuchsabschluß geprüft werden.

- Betonzylinder -

Für die Untersuchung des thermischen Ausdehnungsverhaltens sowie des Schrumpfens und des Schwindens wurden je Betonsorte (Balken 1 bis 6) 2 Probekörper in zylindrischen, dampfdicht verschlossenen, dünnwandigen Blechgefäßen mit einem Durchmesser von ca. 100 mm und einer

Länge von 227,5 mm hergestellt. Über die Lagerungsbedingungen und die Behandlung der Probekörper wird in Abschnitt 2.4.1 in Verbindung mit der Durchführung der Messungen berichtet.

- Prismen aus Zementmörtel und Zementpaste -

Zu Untersuchungen der Gefügeentwicklung des Zementsteines sowie der Festigkeitsentwicklung von Zementmörtel, insbesondere aber auch zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit des verwendeten Zementes wurden Prismen mit Abmessungen von 4 cm x 4 cm x 16 cm benutzt. Die Herstellung der Probekörper ist in Abschnitt 2.1.1.4 beschrieben.

Die Lagerung der Probekörper aus Zementmörtel erfolgte gemäß DIN 1164 Bl. 7 (3). Insgesamt waren 8 Sätze mit je 3 Prismen für die Prüfungen auf Biegezug- und Druckfestigkeit zu verschiedenen Altersstufen vorhanden.

Die insgesamt 64 Prismen aus Zementstein, von denen je eines pro W/Z-Wert und pro Altersstufe zur Verfügung stand, wurden bis zu den Prüfungen auf Biegezug- und Druckfestigkeit in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung gelagert. Die Reststücke der Prismen nach den Prüfungen dienten - soweit erforderlich - als Probematerial für die Porositätsuntersuchungen und Entwässerungsversuche.

2.2. Messungen an den Betonbalken

2.2.1. Temperatur

2.2.1.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Zur Messung der Temperaturänderungen wurden NiCr-Konstantan-Thermoelemente mit einer relativen differentiellen Thermospannung von 0,059 mV/°C verwendet. Die zur Herstellung der Elemente verwendeten Thermodrähte waren einzeln und gemeinsam mit PVC isoliert und stammten aus einer Fertigungscharge. Die Enden der Thermoschenkel wurden unter Schutzgas verschweißt und zum Schutz vor Korrosion mit Epoxidharz ummantelt. Die Abhängigkeit der Thermospannung von der Änderung der Temperatur wurde in Schritten von 10 °C zwischen 10 und 90 °C bei einer Bezugstemperatur von 0 °C von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig bestimmt (Meßunsicherheit: $\pm 0,010 \text{ mV} \approx 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Die Bezugsstellen der Elemente waren in mit Quarzsand gefüllten Glasröhrchen untergebracht, die zur Messung in einen Badthermostaten ($0 \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$) getaucht wurden. Die entsprechend Bild 5 in den Meßebenen eines Balkens angeordneten insgesamt 94 Thermoelemente (vgl. auch Bild 8) wurden in je 4 50-poligen Steckverbindungen hinter den Vergleichsstellen zusammengefaßt und zur Messung an einen 24-kanaligen Kompensationsschreiber angeschlossen. So war



Bild 8
Ansicht eines Ausschnittes der Meßebene Q vor dem Betonieren mit Dampfsperre an den Außenseiten, Drahtgitter und daran befestigten Thermoelementen, Feuchtigkeitsmeßelementen und Dehnungsmeßelementen

es möglich, sowohl Temperaturen an bestimmten Meßstellen über längere Zeit mitzuschreiben, wie auch alle Meßstellen einzeln abzufragen.

2.2.1.2. Meßergebnisse

Die unter dem Einfluß der Hydratationswärme des Zementes gemessenen Temperaturen lagen für alle untersuchten Balken innerhalb des in Bild 9 in Abhängigkeit vom Betonalter dargestellten Bereiches, dessen Beginn auf das jeweilige Ende der Betonierarbeiten bezogen wurde. Für den Temperaturanstieg in den Balken war vor allem der Umstand entscheidend, daß die Wärmedämmung an den Balkenoberseiten erst nach jeweils 3 Tagen aufgebracht wurde, um Überhitzungen des Betons zu vermeiden. Insofern waren für die einzelnen Betonbalken typische Temperaturentwicklungen nicht zu erwarten. Wie Bild 9 zeigt, hatten am 28. Tage alle Meßstellen in den Betonbalken wieder Temperaturen zwischen ca. 20 und 22,5 °C erreicht.

Mit Heizbeginn am 28. Tag stiegen die Temperaturen in den Betonbalken erneut an. Die Unterschiede zwischen den an verschiedenen Stellen innerhalb eines Balkenquerschnittes gemessenen

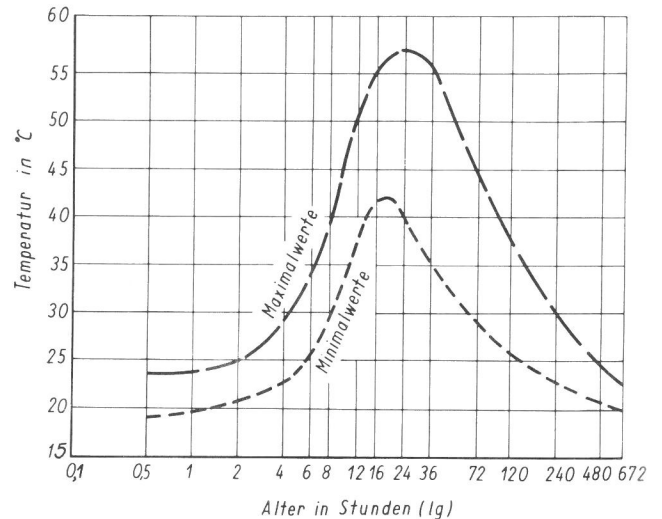


Bild 9
Grenzwerte der nach dem Betonieren der Balken 1 bis 6 durch Hydratationswärme verursachten Betontemperaturen

Temperaturen waren gering. Für die in dieser Hinsicht offenbar ungünstigsten Meßebenen im heißen Bereich der Balken streuten die Temperaturen, wie Bild 10 zeigt, maximal etwa $\pm 0,75^\circ\text{C}$ um den Mittelwert. Die im unteren Bereich des Balkens gelegenen Meßstellen wiesen teilweise erhöhte Temperaturen gegenüber den übrigen Meßstellen auf. Abgesehen von dieser Tendenz, die vermutlich dem Einfluß der Gravitation auf die Feuchtigkeitsverteilung im Balkenquerschnitt (66) zuzuordnen ist, waren systematische Unterschiede nicht erkennbar, so daß es gerechtfertigt erschien, für die einzelnen Meßebenen Mittelwerte der Temperaturen zu bilden. Die Bilder 11 und 12 zeigen die Temperaturmittelwerte für die Meßebenen Θ bis Q in Abhängigkeit vom Alter der Balkenbetone, beginnend mit dem 28. Tag. In Bild 13 sind für verschiedene Betonalter Temperaturverteilungen über die Balkenlänge sowie deren Unterschiede in Abhängigkeit vom W/Z-Wert des Betons dargestellt.

2.2.2. Wärmestrom

2.2.2.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Die für die Messung der Wärmestromdichte an der beheizten Stirnseite der Balken (vgl. Bild 3) verwendete Methode basiert auf den in Abschnitt 2.5.4 behandelten Gesetzmäßigkeiten der Wärmeleitung durch feste Körper (67, 68). Zur Messung werden Wärmestrom-Meßplatten verwendet, in denen eine große Zahl von Thermoelementen über die Plattendicke verteilt in Reihe geschaltet angeordnet ist. Die beim Wärmedurchgang auftretende Temperaturdifferenz wird als die der Wärmestromdichte proportionale Temperaturspannung gemessen. Der Proportionalitätsfaktor ist die Wärmeleitfähigkeit der Meßplatte (siehe Gl. / 6 / in Abschnitt 2.5.4).

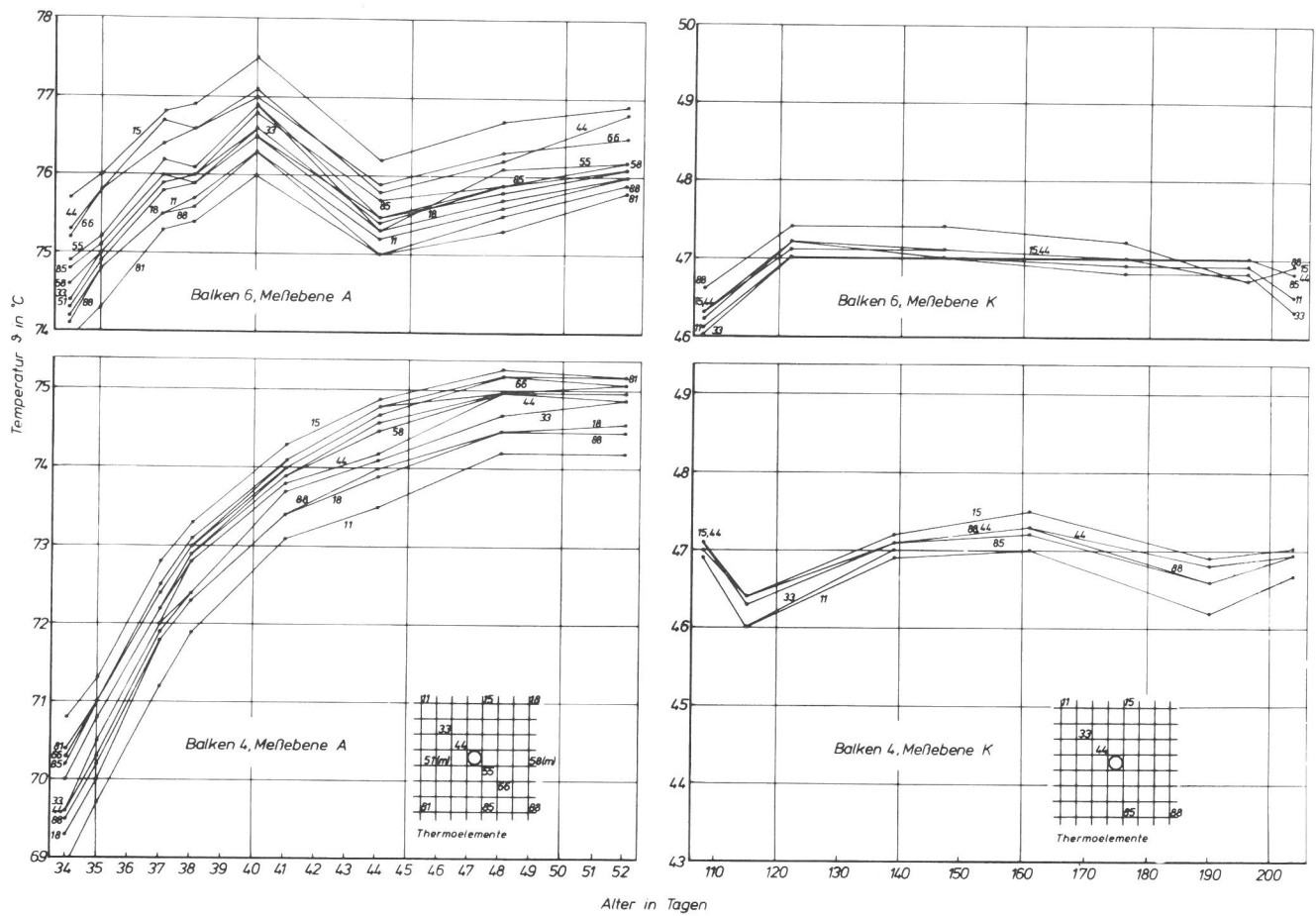


Bild 10
 Beispiele für die Entwicklung der Temperaturverteilung innerhalb des Balkenquerschnittes (Meßebeine A) während der Aufheizphase bis zum 52. Tag und für höhere Alter (Meßebeine K) der Balken 4 und 6

Die mit den Abmessungen 40 cm x 40 cm x 0,6 cm gefertigten 5 Wärmestrom-Meßplatten wurden seitens des Herstellers für Temperaturen zwischen 0 und 100 °C in Stufen zu je 20 °C im Plattengerät nach DIN 52 612 (7) geeicht. Im untersuchten Bereich war die Abhängigkeit zwischen Mitteltemperatur der Meßplatte und auf die Spannung bezogener Wärmestromdichte für alle Meßplatten annähernd linear. Die Empfindlichkeit lag zwischen rd. 8,6 und 7,0 W / m² mV.

Die Platten waren in den Balken 1 bis 5 zwischen Heizplatte und Beton angeordnet, wobei sich zur besseren Wärmeinleitung zwischen Meßplatte und Beton ein Blech aus Weichkupfer von 2 mm Dicke befand. Für die Messungen der Thermospannungen stand ein 12-kanaliger Kompensationschreiber zur Verfügung, so daß die Wärmestromdichte an der beheizten Stirnseite gleichzeitig mit den Temperaturen im Balken gemessen werden konnten.

2.2.2.2. Meßergebnisse

Bei der Auswertung wurden anhand der gemessenen Spannungen unter Berücksichtigung der Mitteltemperaturen der Meßplatten die Wärmestromdichten errechnet. In Bild 14 sind für die Balken 1 bis 5 die Wärmestromdichten in Abhängigkeit vom Alter des Betons aufgetragen. Die unmittelbar nach Heizbeginn an den Balken gemessenen und im Bild nicht mehr dargestellten Werte lagen etwa bei 900 W/m². Während des Aufheizens und auch danach streuten die Meßwerte um etwa ± 0,5 mV (entsprechend rd. 4 W/m²), was im wesentlichen auf Regelschwankungen der Heizplatte zurückzuführen war und daher bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurde.

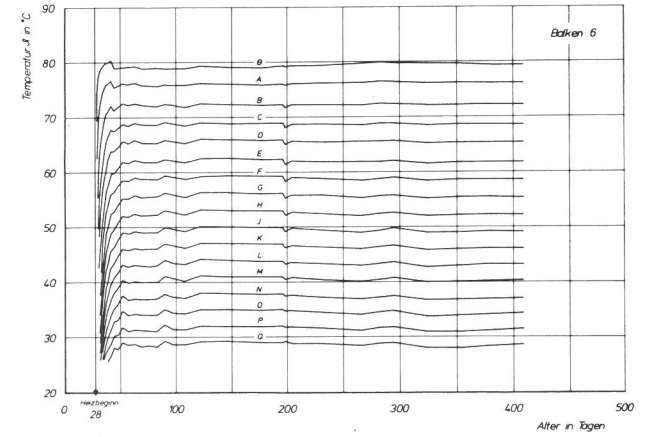
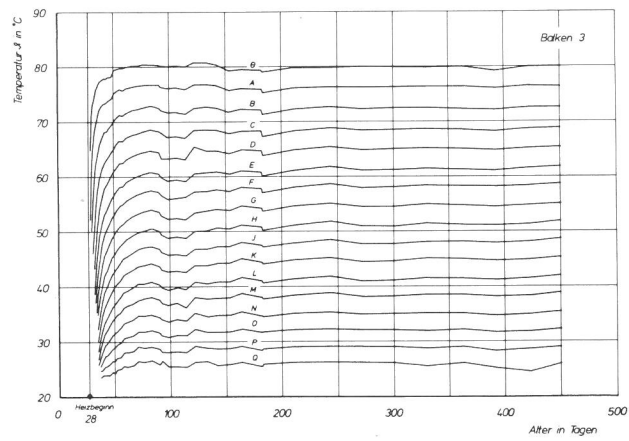
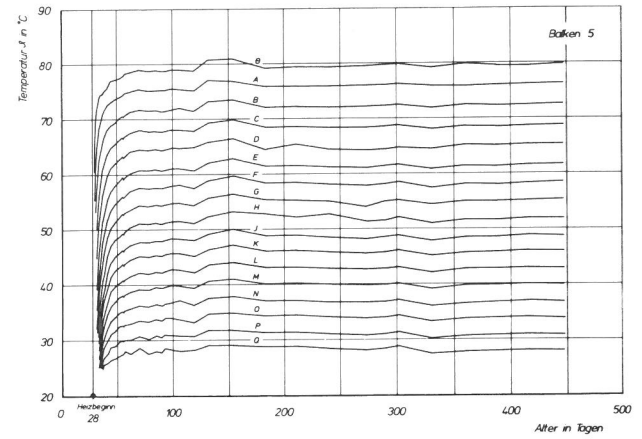
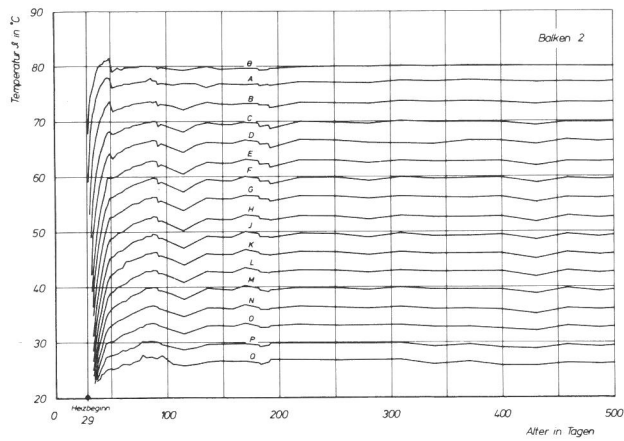
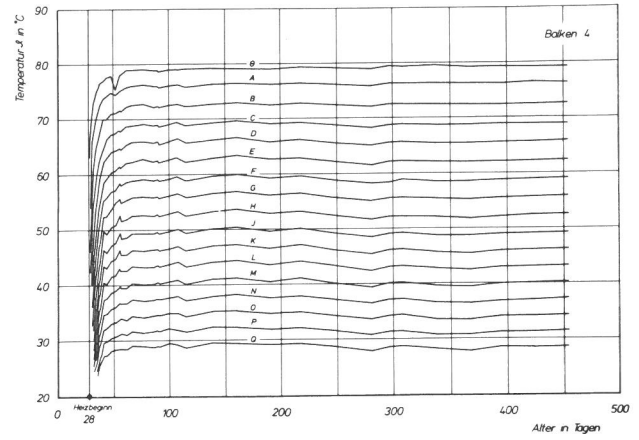
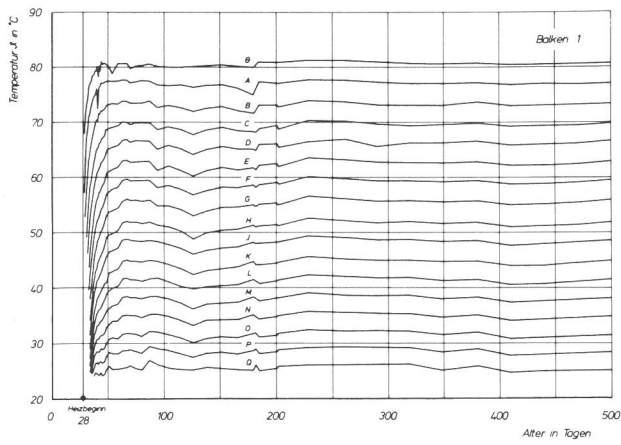


Bild 11
Mittelwerte der Temperaturen in den Meßebenen Θ bis Q in Abhängigkeit vom Alter für die Balken 1, 2 und 3 (Beton mit calcitischem Zuschlag)

Bild 12
Mittelwerte der Temperaturen in den Meßebenen Θ bis Q in Abhängigkeit vom Alter für die Balken 4, 5 und 6 (Beton mit Kiessand-Zuschlag)

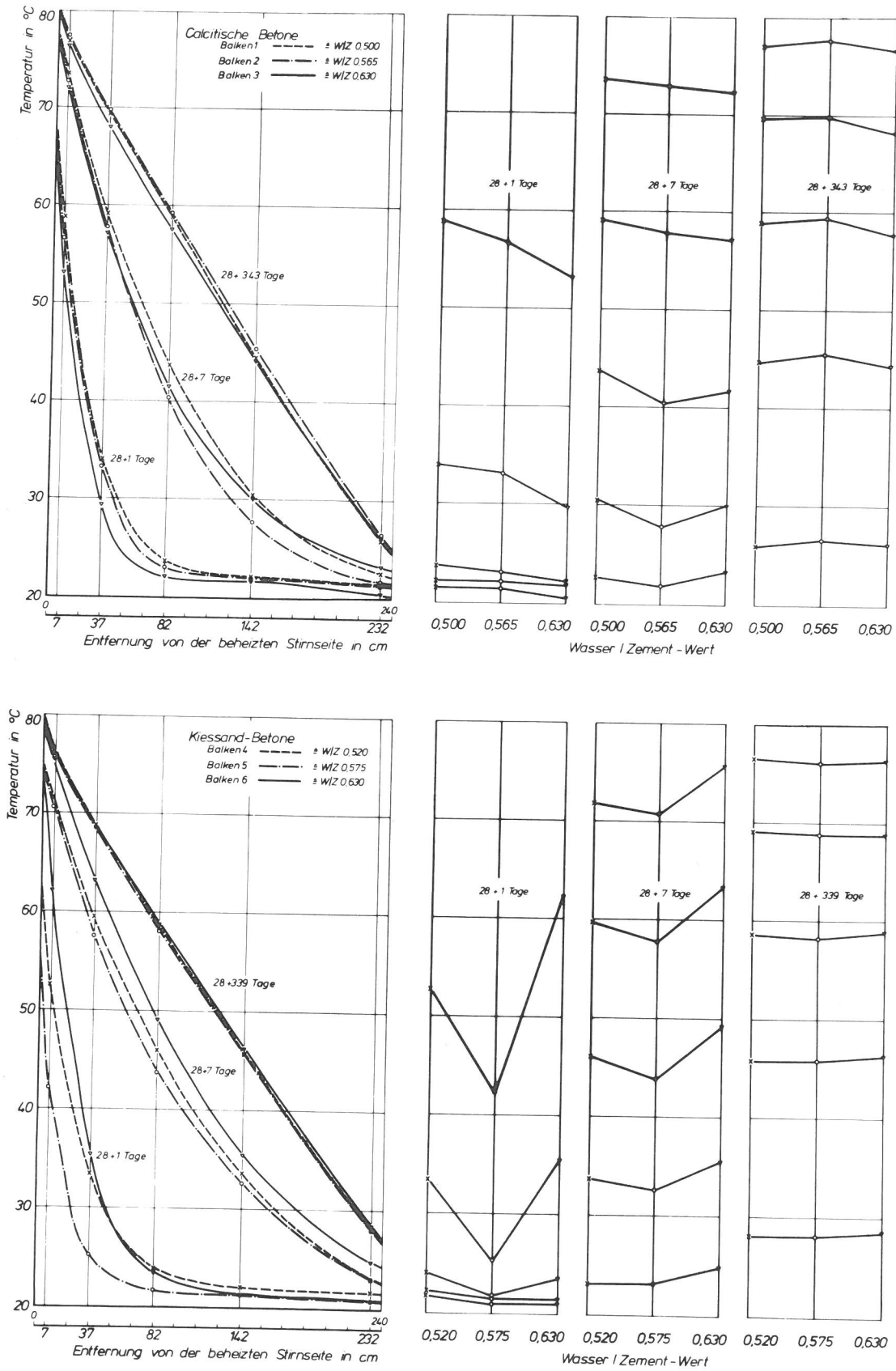


Bild 13

links - Temperaturverteilung über die Balkenlänge für verschiedene Altersstufen

rechts - Temperaturen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert der Betone für bestimmte Entfernungen von der beheizten Stirnseite und für verschiedene Altersstufen

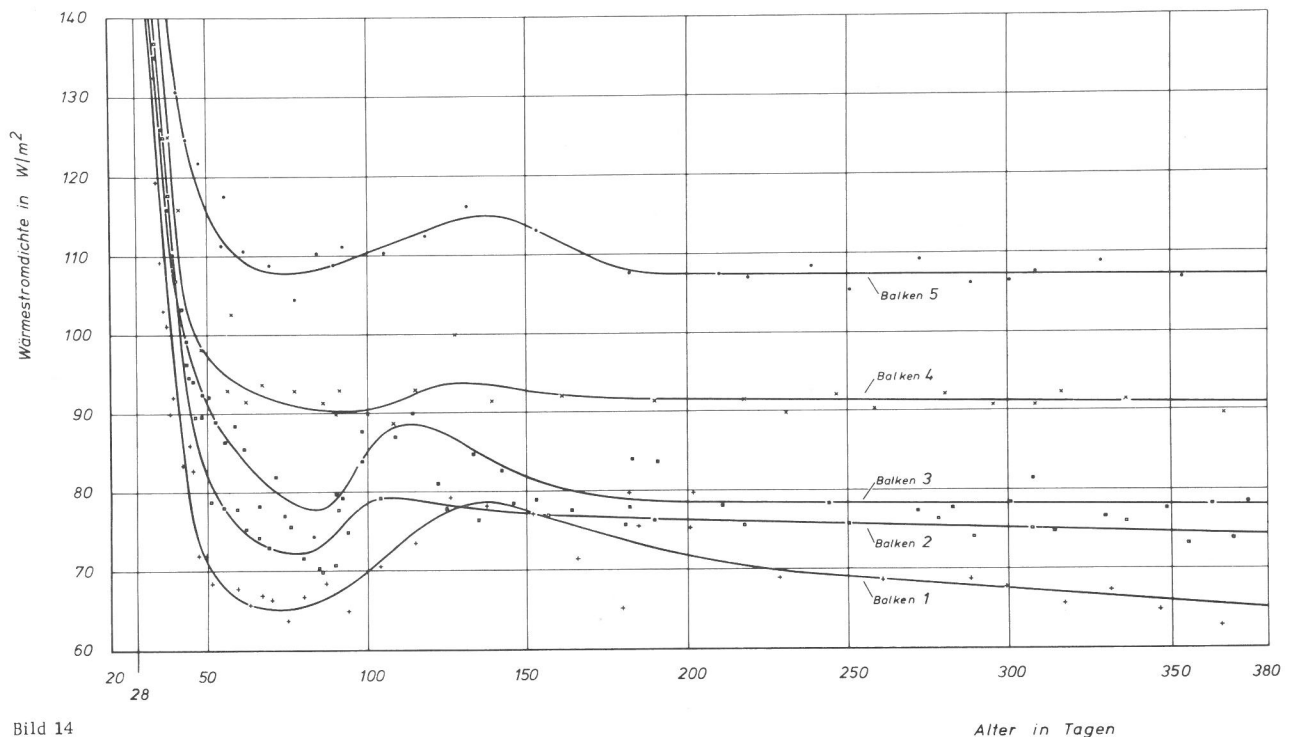


Bild 14
Entwicklung der Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom Alter der Betone nach Heizbeginn am 28. Tag für die Balken 1 bis 5

2.2.3. Wassergehalt

2.2.3.0. Auswahl der Meßmethoden

Die Messung von Feuchtigkeit in Beton bereitet erhebliche Schwierigkeiten, insbesondere dann, wenn der Einfluß der Temperatur hinzukommt und die Messungen über lange Zeit durchgeführt werden müssen. Im Hinblick auf den Untersuchungsumfang war neben Fragen der Reproduzierbarkeit der Messungen sowie der Langzeitstabilität auch der arbeitstechnische und wirtschaftliche Aufwand der infrage kommenden Meßmethoden zu berücksichtigen.

Die endgültige Entscheidung darüber, welche Methoden für die Messungen eingesetzt werden sollten, wurde anhand der Ergebnisse einer gemeinsam mit RILEM^{*)} bei einschlägigen wissenschaftlichen Instituten durchgeführten Umfrage über Verfahren zur Messung von Feuchtigkeit in porösen Stoffen (69) getroffen. Hierbei bestätigte sich, daß aufgrund der spezifischen Meßbereiche und der Eichmöglichkeiten zweckmäßigerweise mehrere ergänzende Methoden gleichzeitig mit der gravimetrischen Methode, bei der der Feuchtigkeitsgehalt durch Trocknung und Wägung ermittelt wird, als Kalibrierverfahren zu benutzen sind.

*) Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

Für die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes an den Betonbalken wurden daher, neben dem im nachfolgenden Abschnitt 2.2.3.2 beschriebenen Wägeverfahren, das die Summe aller Feuchtigkeitsgehaltsänderungen als Gewichtsverluste der Balken erfaßt, folgende Methoden vorgesehen:

- die Messung der elektrischen Leitfähigkeit in Referenzkörpern (Abschnitt 2.2.3.3), die es gestattet, innerhalb eines bestimmten Bereiches die Änderungen des Gehaltes an verdampfbarem Wasser zu ermitteln,
- die Neutronenrückstreuungsmethode (Abschnitt 2.2.3.4), bei der die Summe von verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser gemessen wird,
- die gravimetrische Methode (Abschnitt 2.2.5), mit deren Hilfe nach Abschluß der Untersuchungen und nach dem Spalten der Balken 3 und 6 Proben des Balkenbetons auf den Gehalt an verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser untersucht werden.

Die beiden zuerst genannten Verfahren ergänzen einander, indem durch Differenzbildung aus dem Gesamtwassergehalt und dem Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser das verdampfbare Wasser errechnet werden kann. Der gravimetrischen Methode kommt zusätzlich die Rolle eines Kontrollverfahrens zu.

2.2.3.1. Wägeverfahren zur Bestimmung der Gewichtsverluste

2.2.3.1.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Nach Entfernung des Schalungsbleches zum Heizbeginn am 28. Tage konnten die Balken Feuchtigkeit an der freien Stirnseite abgeben. Der Feuchtigkeitsverlust wird anfangs im wesentlichen durch die äußeren Trocknungsbedingungen bestimmt und ist mit fortschreitender Beheizung in zunehmendem Maße von der Menge der durch den Porenraum zur Trocknungsfront hin beförderten Feuchtigkeit abhängig. Da die Gewichtsverluste des bis auf die freie Stirnseite allseitig versiegelten Balkens demnach ursächlich auf die die Trocknung beherrschenden Vorgänge zurückzuführen sind, war es notwendig, die Änderungen des Balkengewichtes in Abhängigkeit von der Zeit unmittelbar zu messen.

Zu diesem Zwecke wurden die kompletten Versuchsanordnungen regelmäßig angehoben und gewogen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1.1). In den Bildern 5 und 13 ist der I-Tragbalken zu erkennen, der auf 3 Stützen lagernd die Versuchsanordnungen überspannt. Die Hebe- und Wägevorrichtung (Bild 15) besteht aus 2 gegenläufigen Spindeln mit Trapezgewinde in einer von Hand zu drehenden Gewindehülse, die über Gelenke mit einer "Laufkatze" am Tragbalken und einer Kraftmeßdose verbunden ist. An der unteren Gelenköse der Kraftmeßdose hängt der von Seilen auf den Schalendeckel (bei geschlossenem Versuchsaufbau) gespannte Wägebalken. Zur Wägung fand eine elektrische Kraftmeßdose mit Dehnungsmeßstreifen in Vollbrückenschaltung für Druck- und Zugkraft bis 20 kN der Genauigkeitsklasse 0,1 mit einer Empfindlichkeit von 2 mV/V Verwendung, die mit einem manuellen Kompensator hoher Genauigkeit (Meßbereich 100 000 Skt \pm 5 mV/V) als Meßgerät betrieben wurde. Bei einer Überprüfung der Meßanordnung in der Präzisions-Belastungsmaschinenanlage bei einer Temperatur von 20 °C wurde für den Bereich zwischen 15 und 17 kN die Auswertkonstante zu 1 Skt \pm 0,4895N ermittelt.

2.2.3.1.2. Meßergebnisse

Bei den Wägungen der Balken ergaben sich bis zum 28. Tage erwartungsgemäß keine Gewichtsänderungen. Als Bezug für die nachfolgenden Wägungen diente der am 28. Tag unmittelbar vor Heizbeginn ermittelte Wert, von dem ausgehend die Gewichtsänderungen jeweils als Differenz zur vorhergehenden Wägung errechnet und zum Gewichtsverlust addiert wurden. Bild 16 zeigt die Gewichtsverluste der Balken infolge Abgabe von Feuchtigkeit über die freie Stirnseite in Abhängigkeit vom Betonalter. Jeder aufgetragene Wert wurde durch Mittelwertbildung aus mindestens 3 Einzelmessungen gebildet.

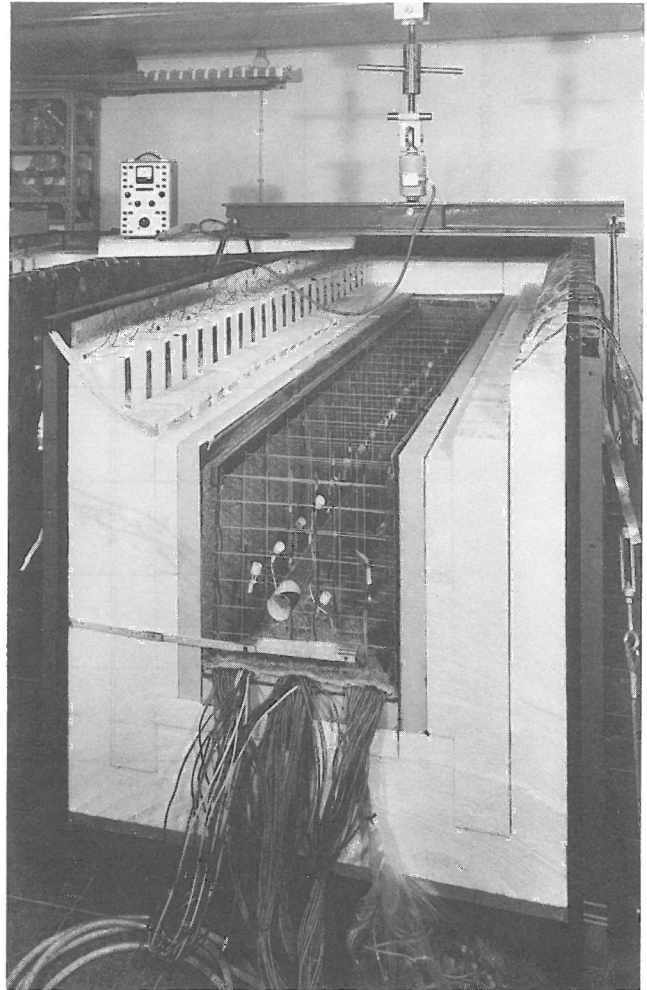


Bild 15

Ansicht einer Versuchsanordnung ohne Schalung auf der Vorderseite vor dem Betonieren; mit Vorrichtung zum Messen der Gewichtsverluste mit Hilfe einer zwischen Tragbalken sowie Spindelhebevorrichtung und Wägebalken gelenkig eingefügten elektrischen Kraftmeßdose

Anhand der Streuungen der Einzelmessungen wurde bei einer statistischen Sicherheit von 95 % für die Mittelwerte ein Vertrauensbereich (81) von $t \cdot s / \sqrt{N} = \pm 0,044$ kg errechnet.

2.2.3.2. Feuchtigkeitsmeßelemente

2.2.3.2.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Das Verfahren, Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes mit Hilfe der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit zu messen, wird seit längerer Zeit mit unterschiedlichem Erfolg eingesetzt (69, 70). Es beruht darauf, daß die Leitfähigkeit eines Referenzstoffes durch das in seine Poren eingedrungene Wasser verändert wird. Gemessen wird zwischen Elektroden, die als Drähte oder auch als Hohlzylinder (46) ausgebildet sind. Um die Entstehung eines durch Polarisation an den Elektroden erzeugten Gegenfeldes zu verhindern, wird i. a. mit Wechselspannung gemessen. Für Untersuchungen an Beton wurden Referenzkörper aus Gips, Zementmörtel, Glasseide und Keramik benutzt, wobei jedoch die in Beton anzutreffenden

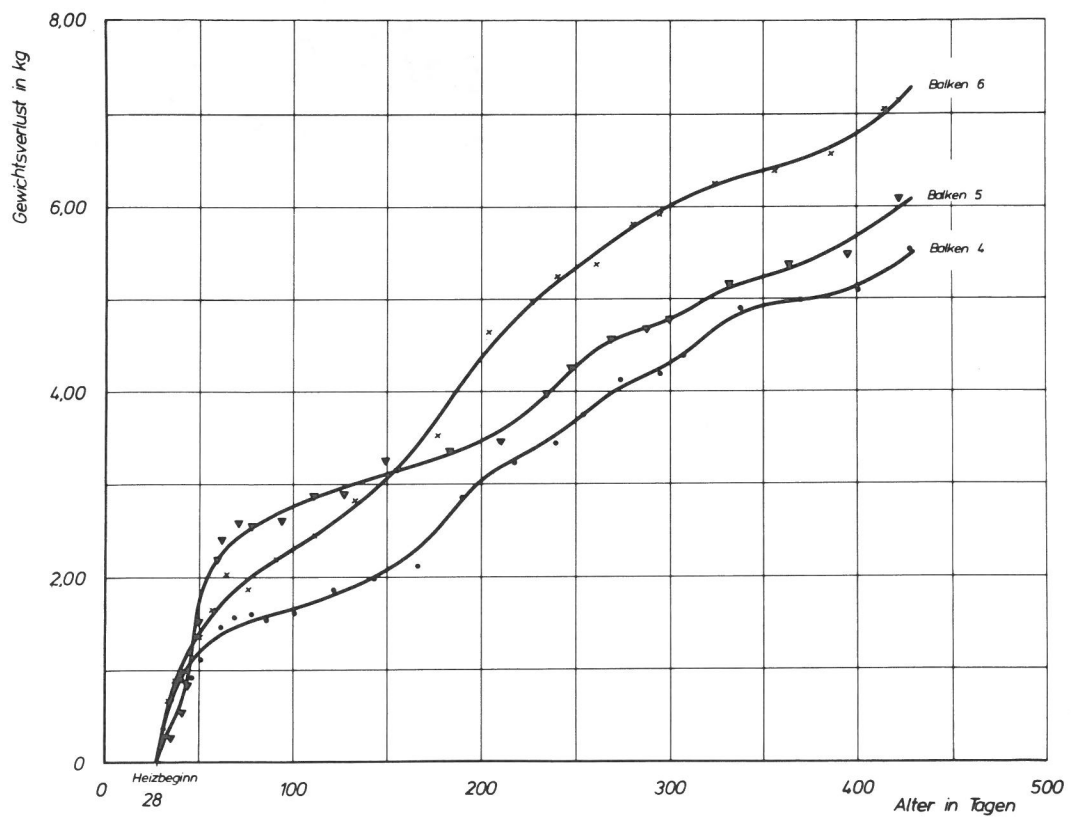
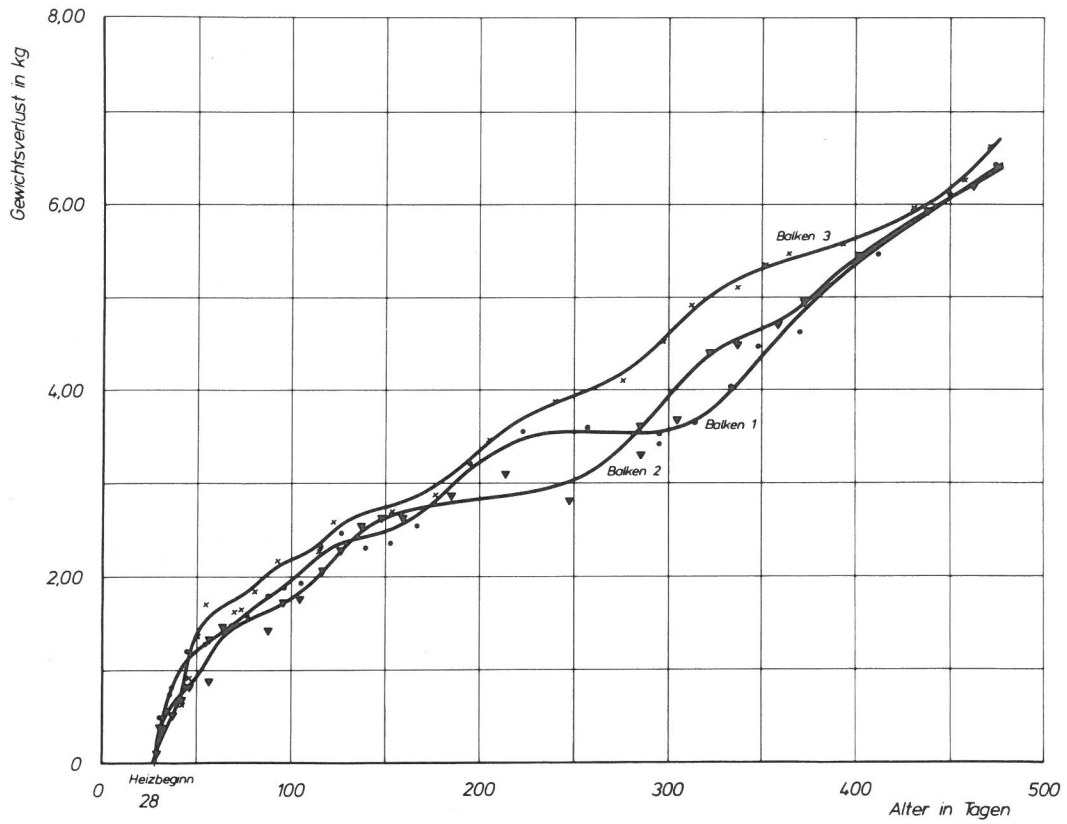


Bild 16
Gewichtsverluste der Balken 1, 2 und 3 sowie 4, 5 und 6, aufgetragen
in Abhängigkeit vom Alter der Betone

Bedingungen unterschiedlich berücksichtigt wurden. Es sind dies der Einfluß der Ionenkonzentration in der Porenlösung auf die Leitfähigkeit sowie veränderliche Übergangswiderstände zwischen Elektrode und Referenzmaterial.

Mit dem von K. Altmann (71, 72) beschriebenen Verfahren erschien es aufgrund von Voruntersuchungen möglich, die speziellen Bedingungen der Meßaufgabe zu erfüllen. Das von ihm benutzte zylindrische Feuchtigkeitsmeßelement (Durchmesser 20 mm, Höhe 20 mm) besteht aus einem bei ca. 1100 °C gebrannten keramischen Material mit zwei darin angeordneten Platinelektroden (vgl. Bild 17). Der keramische Scherben weist ein durch den Herstellungsprozeß und die Rohmasse bedingtes, relativ gleichmäßiges Gefüge mit überwiegend kleinen Poren auf, die geeignet sind, "den Einfluß einer unkontrollierbaren Salzgehaltsänderung, die auch einer unerwünschten zusätzlichen Widerstandsänderung gleichkommt, auszuschalten" (72). Da die Elektroden eingebrannt sind, ist im übrigen mit gleichbleibenden Übergangswiderständen zwischen Elektroden und Referenzmaterial zu rechnen.

Bei den Voruntersuchungen hatte sich bestätigt, daß der Meßaufwand verhältnismäßig klein gehalten werden kann. Als Spannung wurden 11 Volt Wechselspannung 50 Hz verwendet, wobei ein kommerzieller Wechselspannungsstabilisator vorgeschaltet wurde. Als Meßgerät für die Strommessungen diente ein Digitalmultimeter mit nA-Bereich und einer Auflösung von 10 pA im empfindlichsten Bereich. Die Herstellung der Elemente wurde in Auftrag gegeben, wobei gefordert war, daß alle Elemente einer Charge entstammen sollten. Sie wurden ohne Anschlußleitungen und ohne Metallmantel geliefert, damit anhand von Strommessungen im trockenen und im wassergesättigten Zustand sowie mittels der Wasseraufnahmewerte und der Trockenrohddichte die Gleichmäßigkeit der Elemente beurteilt werden konnte.

Die ursprünglich vorgesehene Verdrahtung, bei der die beiden Meßleitungen gemeinsam abgeschirmt auf dem Balkenboden innerhalb des Kupfermantels geführt wurden, mußte geändert werden. Es zeigte sich nämlich, daß infolge der hohen Temperaturen im heißen Bereich der Balken offenbar Feuchtigkeit in die PVC-Isolierung eindrang, die durch Brückenbildung zwischen den Leitern Meßfehler verursachte. Um dies zu verhindern, wurden die abgeschirmten Anschlußleitungen einzeln an den Elektroden angebracht, die Schutzisolierung in einer Bohrung im Meßelement versenkt und beide Leitungen räumlich voneinander getrennt aus dem Balkenquerschnitt herausgeführt. Bild 17 zeigt eines der einbaufertigen Elemente mit Schutzisolierung über den beiden Elektrodenanschlüssen.

Jeder Balken wurde mit insgesamt 24 Feuchtigkeitsmeßelementen ausgestattet, die über Steck-

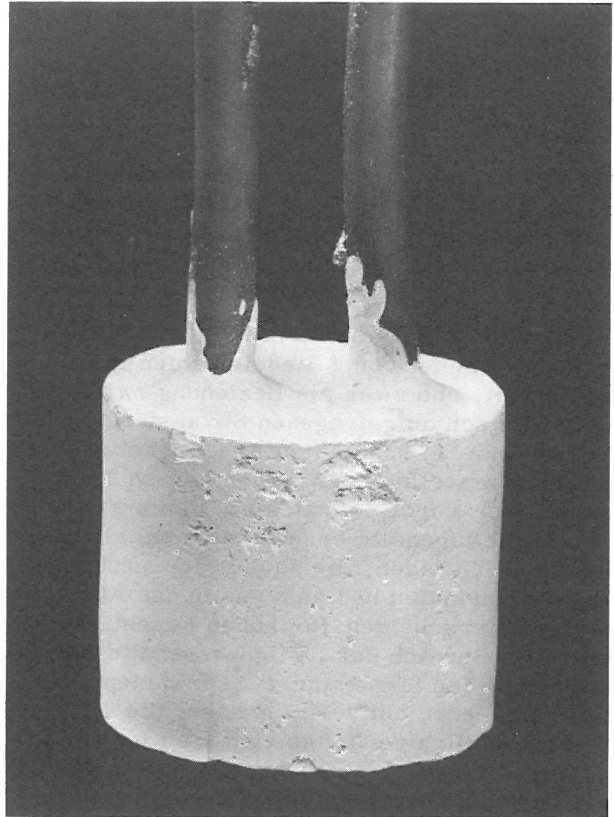


Bild 17
Ansicht eines Feuchtigkeitsmeßelementes (Höhe ca. 2 cm, Durchmesser ca. 2 cm) nach K. Altmann, mit getrennt geführten Meßleitungen

kontakte in den Meßkreis geschaltet werden konnten und deren Anordnung im Balken aus den Bildern 5 und 8 zu entnehmen ist.

Aus den Stromstärkemessungen an den Balken sind die Feuchtigkeitsgehalte unter Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur zu ermitteln. Für die Aufstellung eines entsprechenden Auswertnomogrammes wurden aus den 160 zur Verfügung stehenden Meßelementen 8 repräsentative Stücke ausgewählt, wobei die an allen Elementen nach der Trocknung bei 105 °C sowie nach der Sättigung mit destilliertem Wasser gemessenen Stromstärken, die zwischen ca. 20 und 100 nA bzw. 2 und 6 mA lagen, als Kriterium dienten. Die 8 Meßelemente wurden in der beschriebenen Weise mit Anschlußleitungen versehen, in wassergesättigtem Zustand in starre Stahlgefäße mit dampfdichter Verschraubung und einem Volumen von rd. 135 cm³ eingebracht. Je 4 der Gefäße waren für die Messungen in calcitischem bzw. Kiessand-Beton entsprechend der Zusammensetzung der Balken 2 und 5 vorgesehen. Nach dem Betonieren lagerten die verschlossenen Stahlgefäße 28 Tage bei 20 °C. Im Anschluß daran wurden sie 72 Stunden lang im Wärmeschrank bei einer Temperatur von 80 °C gehalten und danach in Stufen von 12 °C bei jeweils 48-stündiger Haltezeit bis auf 20 °C abgekühlt, wobei zu jeder Temperaturstufe mehrfach Stromstärkemessungen vorgenommen wurden. Nach

dem Abschrauben der Deckel wurde den Betonen Feuchtigkeit im Vakuum von ca. 10^{-1} Torr bei einer Temperatur von $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ entzogen, darauf folgte ein weiterer Temperaturzyklus der vorstehend beschriebenen Art.

Insgesamt waren 6 Trocknungsstufen notwendig, um dem Beton in den Stahlgefäßen das verdampfbare Wasser zu entziehen. Die letzte Trocknung wurde unter Atmosphärendruck bei einer Temperatur von $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

Die für die Nomogramme benötigten Ergebnisse sind am Beispiel von 4 Meßelementen in Bild 18 dargestellt, und zwar als Beziehung zwischen der logarithmisch aufgetragenen Stromstärke und der Temperatur bei konstanten Feuchtigkeitsgehalten (auf die Darstellung der beiden letzten Trocknungsstufen wurde verzichtet). Für mittlere Feuchtigkeitsgehalte ergeben sich bei allen Meßelementen Geraden, die zueinander annähernd parallel verlaufen und sich nur in den Absolutwerten unterscheiden. Bei hohen Feuchtigkeitsgehalten im Bereich der Sättigungsgelände ist ein Grenzwert der Stromstärke zu erwarten, der umso eher erreicht wird, je höher die Temperatur ist. Ähnlich verhalten sich die Kurven für niedrige Feuchtigkeitsgehalte, sie streben jedoch mit fallender Temperatur einem Grenzwert zu,

Das aus diesen Untersuchungen resultierende Auswertnomogramm, aufgetragen für den Parameter Temperatur, zeigt Bild 19; es gilt für den Bereich von etwa 45 bis 135 g Wasser/dm^3 Beton, und zwar unabhängig von der Art des untersuchten Betons.

Ein Vergleich mit den von Altmann angegebenen Werten (73) läßt prinzipielle Unterschiede nicht erkennen, wenn man von der größeren Gleichmäßigkeit der von ihm benutzten Meßelemente absieht. Bemerkenswert dürfte jedoch sein, daß einem annähernd gleichen Feuchtigkeitsmeßbereich ein höherer Stromstärke- bzw. Widerstandsbereich entspricht, was auf Unterschiede in der Porenstruktur des keramischen Materials hindeutet. Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß bei den Messungen an den Balken im allgemeinen mit abnehmenden Feuchtigkeitsgehalten und nur geringfügigen Zunahmen der Feuchtigkeitsgehalte z. B. in Balkenmitte zu rechnen ist, so daß Hysteresiseffekte der Meßelemente - wenn überhaupt - von unwesentlicher Bedeutung sind.

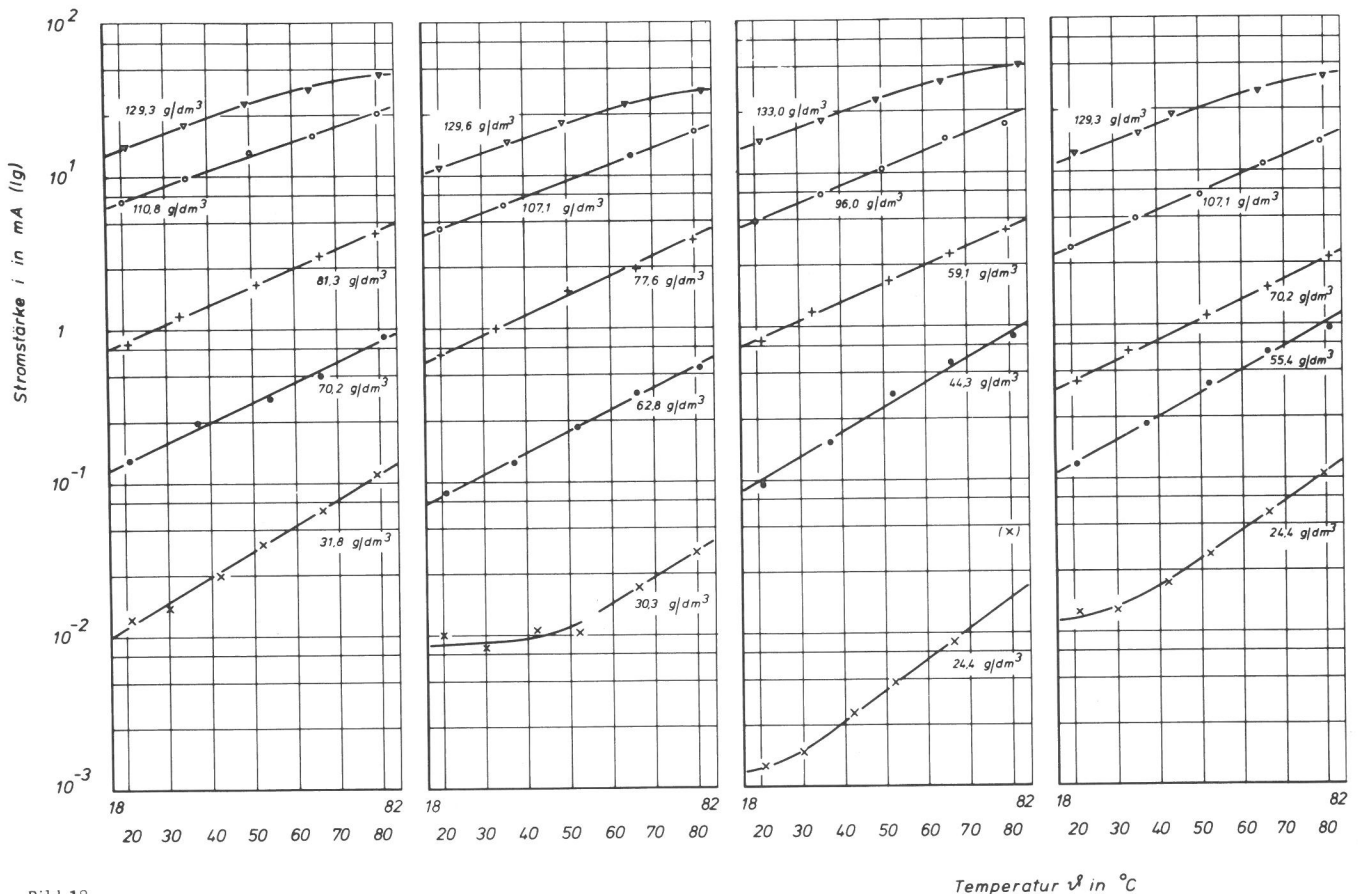


Bild 18
Abhängigkeit der Stromstärke (i) von der Temperatur (T) bei konstanten Gehalten an verdampfbarem Wasser für 4 verschiedene Meßelemente in zylindrischen Betonprobekörpern (Leitfähigkeitsmethode nach K. Altmann)

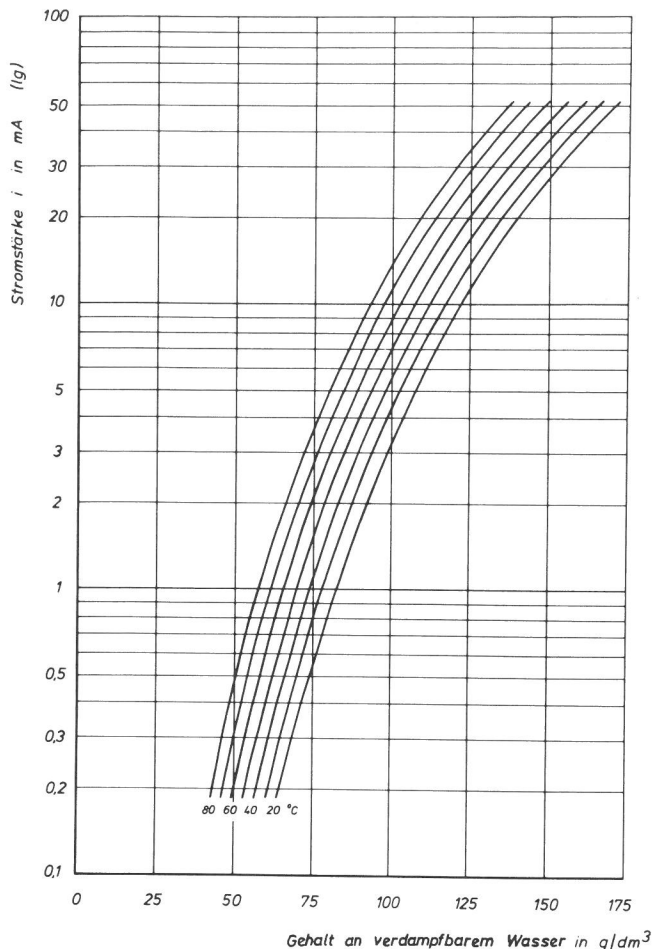


Bild 19
Abhängigkeit der Stromstärke vom Gehalt an verdampfbarem Wasser des Betons bei Temperaturen zwischen 20 und 80 °C; Auswertnomogramm für die Feuchtigkeitsmeßelemente (Leitfähigkeitsmethode nach K. Altmann)

2.2.3.2.2. Meßergebnisse

In Bild 20 sind die ursprünglich gemessenen Stromstärken in Abhängigkeit vom Betonalter für einige Elemente in charakteristischen Meßebenen des Balkens 4 aufgetragen, wobei der Übersichtlichkeit halber die Meßpunkte selbst nicht eingezeichnet wurden. Rechts im Diagramm sind die Ebenen mit den Entfernungen von der heißen Stirnseite sowie die Bereiche der Meßebenentemperaturen nach Beendigung der Aufheizphase angegeben. Bis zum Heizbeginn am 28. Tage zeigen alle Meßelemente ein gleichartiges Verhalten. Das Absinken der Stromstärke zum 28. Tage hin wird vor allem durch die Abkühlung des Betons verursacht (vgl. dazu die in Bild 9 dargestellte Temperaturentwicklung nach dem Betonieren), in geringerem Umfange auch durch den Entzug von verdampfbarem Wasser infolge Hydratation.

Obgleich alle Meßelemente am 28. Tag annähernd gleiche Feuchtigkeitsgehalte in der Größenordnung von 100 g/dm^3 (Balken 4) aufweisen mußten, wurden voneinander abweichende Stromstärken zwischen 5 und 15 mA gemessen. In der sich anschließenden Aufheizphase zeigen die Messungen je nach Lage des Elementes im Balken den zu erwartenden Einfluß der Temperatur. Im Falle des Elementes in der Meßebene A ist der Temperatureinfluß offenbar durch den bereits fortgeschrittenen Austrocknungseffekt überlagert, was für die Ebenen C, D, F, F und H innerhalb von rd. 30 Tagen nach Heizbeginn nicht der Fall sein kann, vielmehr muß hier die an der heißen Seite durch die Beheizung "verdrängte" Feuchtigkeit aufgenommen oder befördert werden. Ähnliche Überlegungen, jedoch unter Berücksichtigung des geringeren Temperatursprunges gegenüber dem Heizbeginn, gelten auch für die Ebenen N, O und Q.

Insgesamt ließ sich aus den Stromstärkeänderungen in Abhängigkeit von der Zeit, wie sie in Bild 20 für Balken 4 dargestellt sind, entnehmen, daß auch die im Balken eingesetzten Elemente vermutlich geringe Unterschiede in der Porenstruktur des keramischen Scherbens aufweisen, was zu Abweichungen in den Absolutwerten führt, jedoch ohne praktischen Einfluß auf die Meßcharakteristik ist. Zur Auswertung mit Hilfe des Nomogrammes in Bild 19 wurden daher nach Ausgleich der Meßkurven nur noch die relativen Änderungen der Stromstärkemessungen benutzt und auf den jeweiligen mittleren Gehalt an verdampfbarem Wasser im Alter von 28 Tagen bezogen.

Es fielen nur einige Elemente aus, deren instabiles Verhalten anhand sprunghafter Änderungen der Meßwerte ohne Schwierigkeit erkannt werden konnte. Wie bereits erwähnt, konnten jedoch die meisten in den höher temperierten Bereichen der Balken 1 bis 3 eingesetzten Elemente infolge der in die Anschlußleitungen eingedrungenen Feuchtigkeit zur Auswertung nicht mehr herangezogen werden.

Die gestrichelten Kurvenzüge der Bilder A 1 bis 12 des Anhangs geben die Entwicklung der Gehalte an verdampfbarem Wasser (Feuchtigkeitsgehalt in Vol.-%) in Abhängigkeit vom Alter für die wichtigsten Meßebenen der Balken 1 bis 6 wieder. Die Meßebenen sind rechts im Bild mit Klammern und dem Buchstaben der Ebene sowie dem entsprechenden Abstand von der beheizten Stirnseite gekennzeichnet.

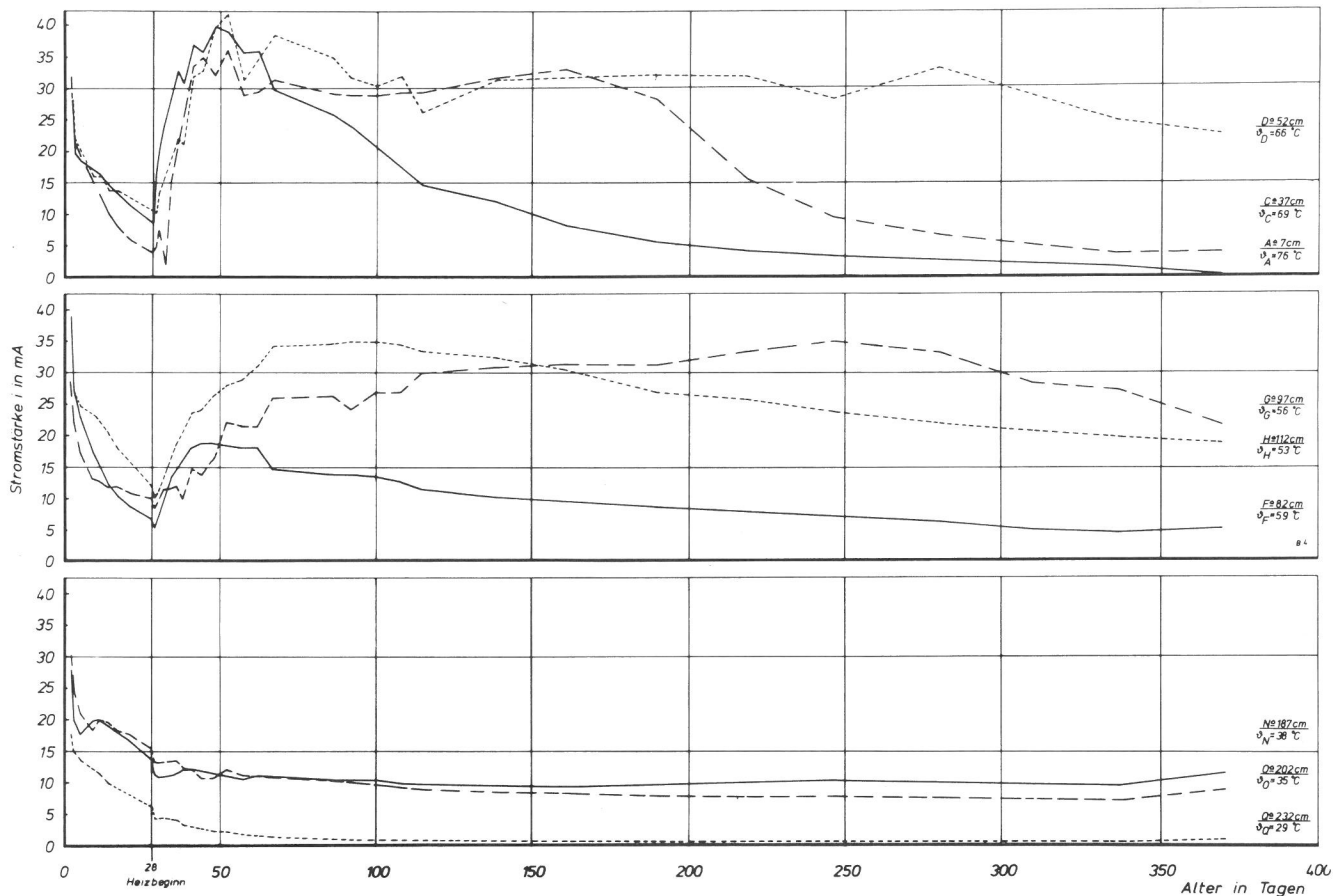


Bild 20

In Abhängigkeit vom Alter mit den Feuchtigkeitsmeßelementen in den Ebenen D, C, A, G, H, F, N, O und Q des Balkens 4 gemessene Stromstärken

2.2.3.3. Neutronensonde

2.2.3.3.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Diese Meßmethode beruht auf dem Effekt der Bremsung schneller Neutronen ($E > 1$ MeV) durch Wasserstoffkerne. Stößt ein aus einer Kernreaktion ((α, n) -Reaktion) einer radioaktiven Neutronenquelle (Antimon-Beryllium, ^{124}Sb -Be; Americium-Beryllium, ^{241}Am -Be etc.) stammendes schnelles Neutron auf seinem Wege durch den Beton auf Wasserstoffkerne, so verliert es bei diesen Zusammenstößen Energie, bis es nur noch thermische Energie ($\approx 0,025$ eV) besitzt. Die bei konstantem Neutronenfluß von einem nur thermische Neutronen registrierenden Detektor gemessene Zählrate ist proportional der Wasserstoffkonzentration im Beton und somit ein Maß für den Wassergehalt. Die kernphysikalischen Grundlagen des Verfahrens sind in der Literatur ausführlich dargestellt (74, 75), so daß hier lediglich auf die für die angewandte Methode wichtigen Einzelheiten einzugehen ist.

Zwar sind Wasserstoffkerne aufgrund ihrer geringen Masse, die etwa der des Neutrons ent-

spricht, überwiegend an der Energieumsetzung durch elastische Stöße beteiligt, da schwere Kerne annähernd verlustfrei zurückstreuen (76). Andererseits läßt sich aber auch der Einfluß schwerer Kerne bei der Neutronenbremsung nachweisen (77). Dabei ist neben dem Einfluß der Dichte insbesondere auch zu beachten, daß die Streuung an Wasserstoffkernen in Vorwärtsrichtung erfolgt, während an schweren Kernen in alle Richtungen gleichmäßig gestreut wird, was zur Verteilung der Neutronen führt. Insofern ist der Meßeffect auch von der chemischen Zusammensetzung sowie der Dichte des zu untersuchenden Stoffes abhängig.

Um den Strahler bildet sich eine Wolke von Neutronen, deren Dichte mit zunehmender Entfernung von der Quelle geringer wird. Ist der Gehalt an Wasserstoffatomen groß, so sind die thermischen Neutronen in der Nähe der Quelle konzentriert und das erfaßte Meßgebiet ist klein. Bei geringem Wasserstoffgehalt ist das Einflußvolumen größer (78).

Als weitere Einflußgrößen sind die geometrischen Bedingungen, also Form und Volumen des zu untersuchenden Stoffes sowie Einflüsse an-

grenzender Medien zu nennen und ferner die besonderen Eigenarten der Meßanordnungen, bei denen zwischen Durchstrahl- und Rückstreumethoden zu unterscheiden ist. Im ersten Falle befindet sich das Meßgut zwischen Strahler und Detektor, im zweiten Fall sind Strahler und Detektor in einer Einheit angeordnet, z. B. in Form einer sogenannten Tauchsonde ("Neutronensonde"). In diesem Zusammenhang ist ferner erwähnenswert, daß der Bremseffekt durch Temperatureinflüsse kaum beeinträchtigt werden dürfte, was allerdings für unmittelbar dem Temperatureinfluß ausgesetzte elektrische Meßteile einer Neutronensonde nicht ohne weiteres angenommen werden darf.

Neutronensonden werden seit längerer Zeit erfolgreich z. B. für Feuchtigkeits- und Dichtemessungen in Böden eingesetzt (75). Für die vorliegende Aufgabenstellung erschien ein Durchstrahlverfahren ungeeignet, weil Dampfsperre, Wärmedämmung und Schalelemente den seitlichen Zugang zum Betonkörper behindert hätten. Da der Beton allein von der freien Stirnseite zugänglich war, bot es sich an, für die Messungen eine Neutronensonde zu verwenden, die in einem in der Balkenlängsachse angeordneten und an der beheizten Seite verschlossenen Glasrohr verschoben werden konnte (Bilder 3, 8 und 15).

Um die Messungen möglichst wenig zu beeinträchtigen, sollte das Rohr aus Glas bestehen, das z. B. im Vergleich zum Stahl eine geringere Bremswirkung gegenüber durchtretenden Neutronen aufweist (75). Die Anordnung birgt den Vorteil, daß die geometrischen Bedingungen von Messung zu Messung in einem Balken gleich sind und daß die chemische Zusammensetzung und die Struktur des gemessenen Betons bezüglich der Meßlinie (Balkenlängsachse) stets dieselben sind, wenn man von den durch den Reifefortschritt bedingten Änderungen absieht.

Anhand von Versuchsmessungen an Behältern mit Quarzsand unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehaltes und Betonkörpern (40 cm x 40 cm x 70 cm) wurden mit einer in der Bundesanstalt gebauten Sonde (1 Ci Am-Be - Neutronenquelle mit Bortrifluoridzählrohr) die Bedingungen für die an den Versuchsbalken einzusetzende Sonde festgelegt:

- Die Strahlenquelle sollte eine möglichst homogene Neutronenenergieverteilung besitzen.
- Da Strahler und Detektor theoretisch in einem Punkt angeordnet sein sollten, kam als Detektor nur ein Szintillationszähler mit geringen Abmessungen infrage, der darüber hinaus gegenüber einem BF_3 -Zählrohr erhebliche, die Zählgenauigkeit betreffende Vorteile besitzt.
- Der Neutroneneinfall in den Detektor war durch Cd-Blenden zu begrenzen, um ein möglichst hohes Auflösungsvermögen zu erreichen.

- Der Durchmesser der stabförmigen Sonde sollte möglichst klein sein.

Die anhand dieser Anforderungen zum Bau in Auftrag gegebene Sonde hat folgende Daten:

Strahlenquelle: $^{241}\text{Am-B}$
 Aktivität 1 Ci
 Neutronenausbeute $5 \cdot 10^5$ n/s
 Halbwertszeit 458 Jahre

Szintillationszähler: Li-Glas.

Der Durchmesser der Sonde war mit 36 mm durch die Abmessungen des Vorverstärkers bestimmt.

Bild 21 zeigt den vollständigen, für automatischen Betrieb entwickelten Versuchsaufbau. Die an einem Nockenstab geführte Sonde (vor der freien Stirnseite eines Balkens) wird, mittels Lichtschranken gesteuert, mit einer Vortriebseinrichtung von Meßstelle zu Meßstelle durch das Glasrohr im Balken geschoben. Die Meßwerte gibt ein Drucker als Zählraten (Imp./min) aus. Sie sind jeweils einer durch die Anordnung der Nocken am Führungsstab vorgegebenen Meßstelle im Balken zugeordnet. Der geringste programmierbare Meßstellen- bzw. Nockenabstand beträgt 15 mm.

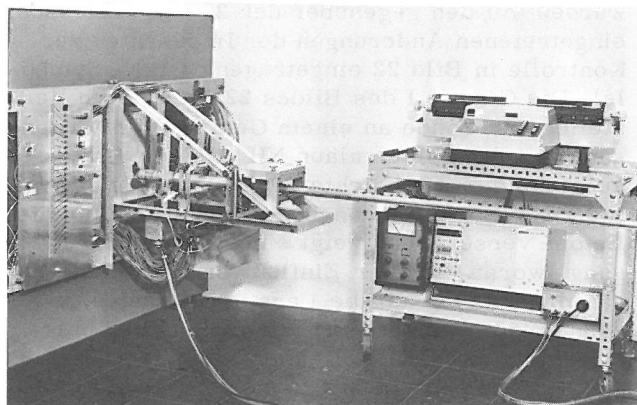


Bild 21
 An einem Nockenstab geführte Neutronensonde mit Meß-, Registrier-, Steuer- und Vortriebseinrichtung zur selbst tätigen Aufnahme von Gesamtwassergehaltsprofilen entlang der Balkenlängsachse

Bei den Untersuchungen für die Aufstellung der Eichkurve konnte davon ausgegangen werden, daß für Normalbetone in einem weiten Bereich des Feuchtigkeitsgehaltes mit einer linearen Abhängigkeit zu rechnen ist (74, 75, 79). Im Bereich niedriger Wassergehalte, wo die Dichteverteilung der thermischen Neutronen in der Umgebung der Strahlenquelle herabgesetzt und das Einflußvolumen vergrößert ist, wäre zwar eine Abweichung von der Geraden denkbar, jedoch ist bei vollständiger Austrocknung der Betone noch ein Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser von immerhin 4 bis 6 % bezogen auf das Volumen als niedrigster Wert zu erwarten, wobei das Einflußvolumen noch annähern innerhalb des Balkenquerschnittes liegt.

Bereits bei Vorversuchen wie auch später hatte sich gezeigt, daß Eichgeraden, die an Sanden verschieden hohen Wassergehaltes ermittelt worden waren, wegen des Dichteunterschiedes als Bezug für Messungen an Beton ungeeignet sind. Deshalb wurden die bis zum 28. Tage über die Balkenlänge gemessenen Zählraten gemittelt und mit den Wassergehalten der in den Versuchsanordnungen verdichteten Frischbetone korreliert. Für die Balken 4, 5 und 6 ergab sich die in Bild 22 mit II gekennzeichnete Gerade, zu der die Gerade III für die Balken 2 und 3 parallel verläuft. Der Wert für Balken 1 liegt zwar in unmittelbarer Umgebung jedoch auf keiner der dargestellten Geraden, was offenbar auf Verdichtungs-mängel des Balkens 1 zurückzuführen ist. Zunächst konnten für den unteren Teil des Meßbereiches keine Bezugswerte ermittelt werden. Dies war erst möglich, nachdem die Balken 3 und 6 gespalten waren und die gravimetrisch ermittelten Wassergehalte für die Randzonen der Balken vorlagen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Diese wurden mit den gegenüber der 28-Tage-Messung eingetretenen Änderungen der Impusraten zur Kontrolle in Bild 22 eingetragen ((x) - Symbole). Die Gerade I des Bildes 22 wurde vom Hersteller der Sonde an einem Gemisch aus Quarzsand und Ammoniumalaun $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ aufgenommen (Rohdichte des Gemisches ca. $1,4 \text{ kg/dm}^3$). Sie ist gegenüber den Geraden für die Betone versetzt und zeigt eine etwas andere Neigung, woran sich der Einfluß von Dichte und Zusammensetzung auf die Lage der Geraden erkennen läßt. Um bei der Auswertung der Messungen an den Balken Fehler infolge unterschiedlicher Dichte und Zusammensetzung des Betons von vornherein auszuschließen, wurde die Auswertbeziehung der Geraden II zunächst nur für die Ermittlung der relativen Änderungen des Gesamtwassergehaltes herangezogen.

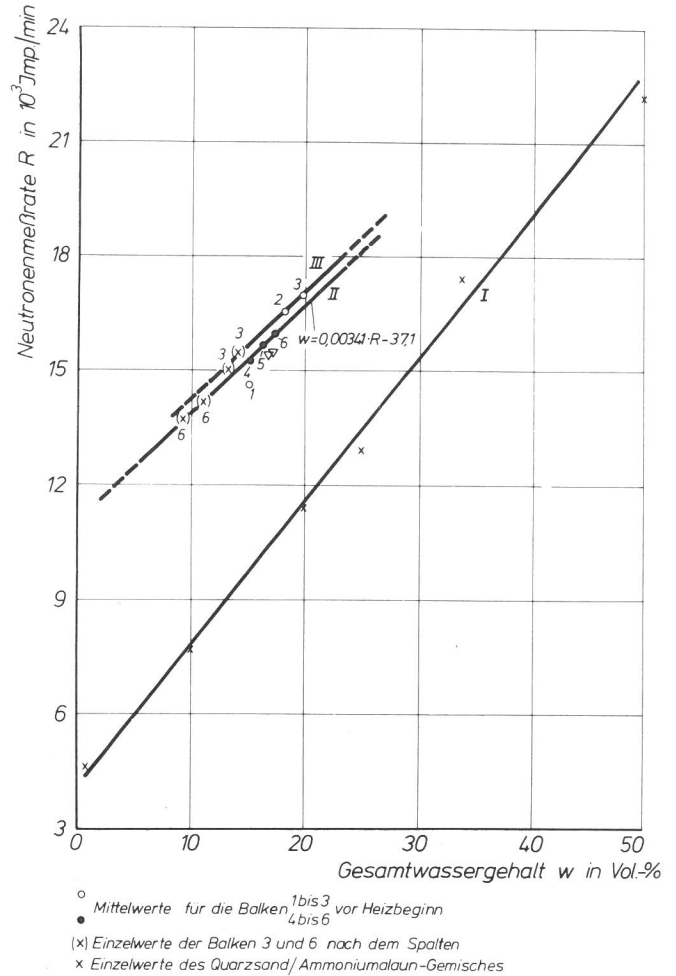


Bild 22

Abhängigkeit zwischen Neutronenmeßrate (R) und Gesamtwassergehalt (w) für

- ein Gemisch aus Quarzsand und Ammoniumalaun (Gerade I),
- Beton mit calcitischem Zuschlag der Balken 2 und 3 (Gerade III)
- sowie Beton mit Kiessand-Zuschlag der Balken 4, 5 und 6 (Gerade II mit der Auswertbeziehung $w = 0,00341 \cdot R - 37,1$)

Außerdem war es notwendig, den geometrischen Bezugspunkt der Sonde (Einfallspunkt der thermalisierten Neutronen) zu ermitteln. Dieser lag außerhalb der Mitte des Detektors, und zwar um 1,5 cm zum Strahler hin versetzt. Aus Bild 23 geht das für die Korrektur benutzte Verfahren hervor: an einem Betonbalken (40 cm x 40 cm x 70 cm) mit einem in Balkenlängsachse angeordneten durchgehenden Glasrohr wurde von beiden Stirnseiten ausgehend jeweils ein Profil aufgenommen. Die beiden Profile sind gegeneinander um den 2-fachen Korrekturbetrag (A) von der Mitte des Detektors versetzt.

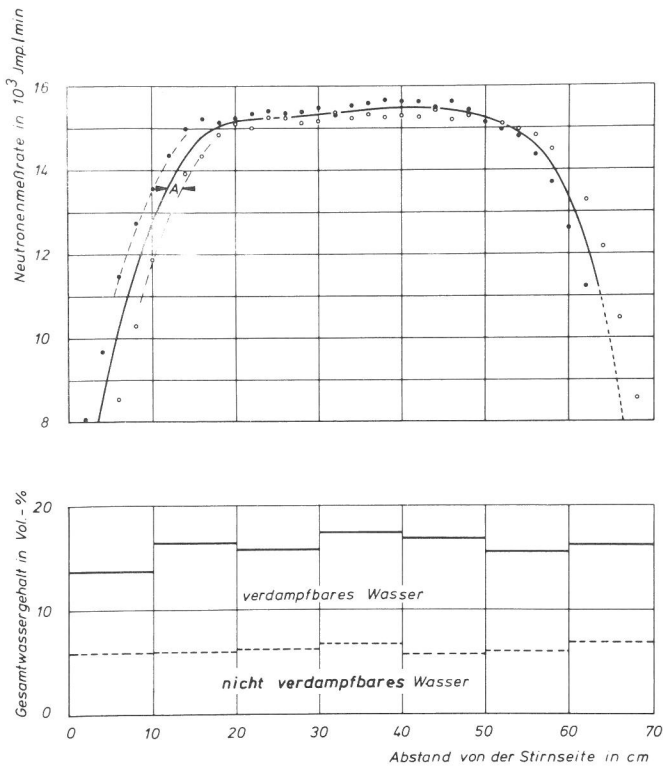


Bild 23
Neutronenmeßraten (10^3 Imp./min) bei gegenläufigem Sondenvortrieb und gravimetrisch ermittelte Wassergehalte (Vol.-%) eines rd. 1,5 Jahre alten Balkens (40 cm x 40 cm x 70 cm) aus Kiessand-Beton, aufgetragen über die Balkenlängsachse (Vorversuch an einem Balken mit allseitiger Dampfsperre und einer freien Stirnseite; Dauer der Beheizung 30 Tage)

Auch wenn Temperaturunterschiede ohne nennenswerten Einfluß auf den Rückstreuungseffekt sind, war doch mit einer Beeinträchtigung der Messungen aufgrund der Erwärmung des Szintillators und Fotomultipliers zu rechnen, ferner auch mit Alterungseffekten der elektronischen Bauelemente. Um solche Einflüsse zu vermeiden, wurde der Hauptverstärker mit einer sogenannten Driftstabilisation ausgestattet. Bei Messungen im Wasserbad innerhalb des interessierenden Temperaturbereiches konnten Veränderungen der Impulsrate nicht nachgewiesen werden. Desgleichen ließ die Meßeinrichtung nach den Messungen, die zu einer Erwärmung der Sonde geführt hatten, keine Abweichungen der in einem Paraffinbehälter gemessenen Impulsraten vor bzw. nach der Erwärmung erkennen. In Bild 24 sind regelmäßig vor und nach jedem Meßvorgang im Behälter aufgenommene Zählraten über eine Zeitspanne von 300 Tagen aufgetragen. Sie lassen keine wesentlichen Unterschiede erkennen. Jedoch ist die "Behälterzählrate" geringer geworden, was auf Alterungserscheinungen der Meßeinrichtung zurückzuführen ist und bei der Auswertung berücksichtigt werden mußte.

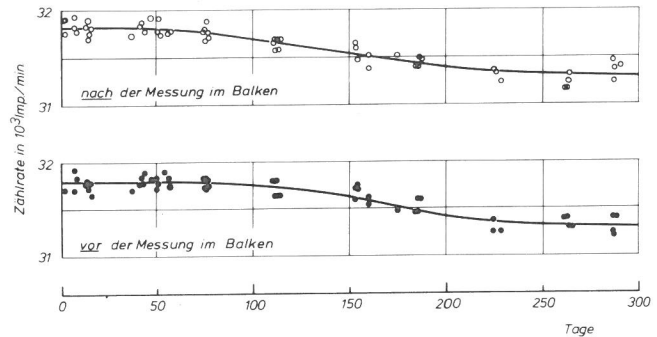


Bild 24
Mit der Neutronensonde vor und nach jeder Messung im Paraffinbehälter (Durchmesser und Höhe 42 cm) gemessene Zählraten, aufgetragen über eine Zeitspanne von 300 Tagen

2.2.3.3.2. Meßergebnisse

Da von den Balken bis zum Heizbeginn am 28. Tage keine Feuchtigkeit abgegeben werden konnte und bei der Neutronenmessung zwischen der Art der Bindung der Wasserstoffatome nicht unterschieden wird, war es möglich, die bis dahin vorgenommenen Messungen ohne Berücksichtigung des Betonalters für die Aufstellung der Auswertbeziehung (Gerade II in Bild 22) zu verwenden. Außerdem wurden am 28. Tag vor Heizbeginn Meßprofile an den Balken aufgenommen, die für die Untersuchungen nach Heizbeginn als Bezugswerte dienen. Die Profile sind in den Bildern 25 und 26 für die Balken 1, 2 und 3 sowie 4, 5 und 6 dargestellt. Nähere Erläuterungen dazu werden in Abschnitt 2.5 gegeben.

Für die Aufnahme der Profile über die Längsachse der Balken wurden Meßstellenfolgen mit Hilfe des Nockenstabes vorgegeben. An den äußeren Balkenenden betrug der Abstand der Meßstellen voneinander 1,5 cm und im Balkeninneren waren 3 cm vorgesehen. Eine Meßstellenfolge enthielt maximal 84 Meßstellen, wobei die erste Meßstelle 8,3 cm und die letzte 230,6 cm von der heißen Stirnseite entfernt lag. Bei diesen Untersuchungen betrug die Meßzeit 1 Minute pro Meßstelle.

Die so zu bestimmten Altersstufen des Betons in der Art von Längsprofilen aufgenommenen Neutronenmeßraten wurden anhand der Auswertbeziehung zunächst in Gesamtwassergehalte umgerechnet, die ihrerseits nach einer Ausgleichsrechnung zum nächstjüngeren Meßprofil und zum Meßprofil am 28. Tag in Bezug gesetzt werden konnten.

Bild 27 zeigt typische Meßprofile für vier verschiedene Altersstufen. Es ist zu berücksichtigen, daß die Profile bezüglich der geometrischen Besonderheiten in den Randzonen nicht korrigiert sind und daß die gestrichelte Bezugslinie

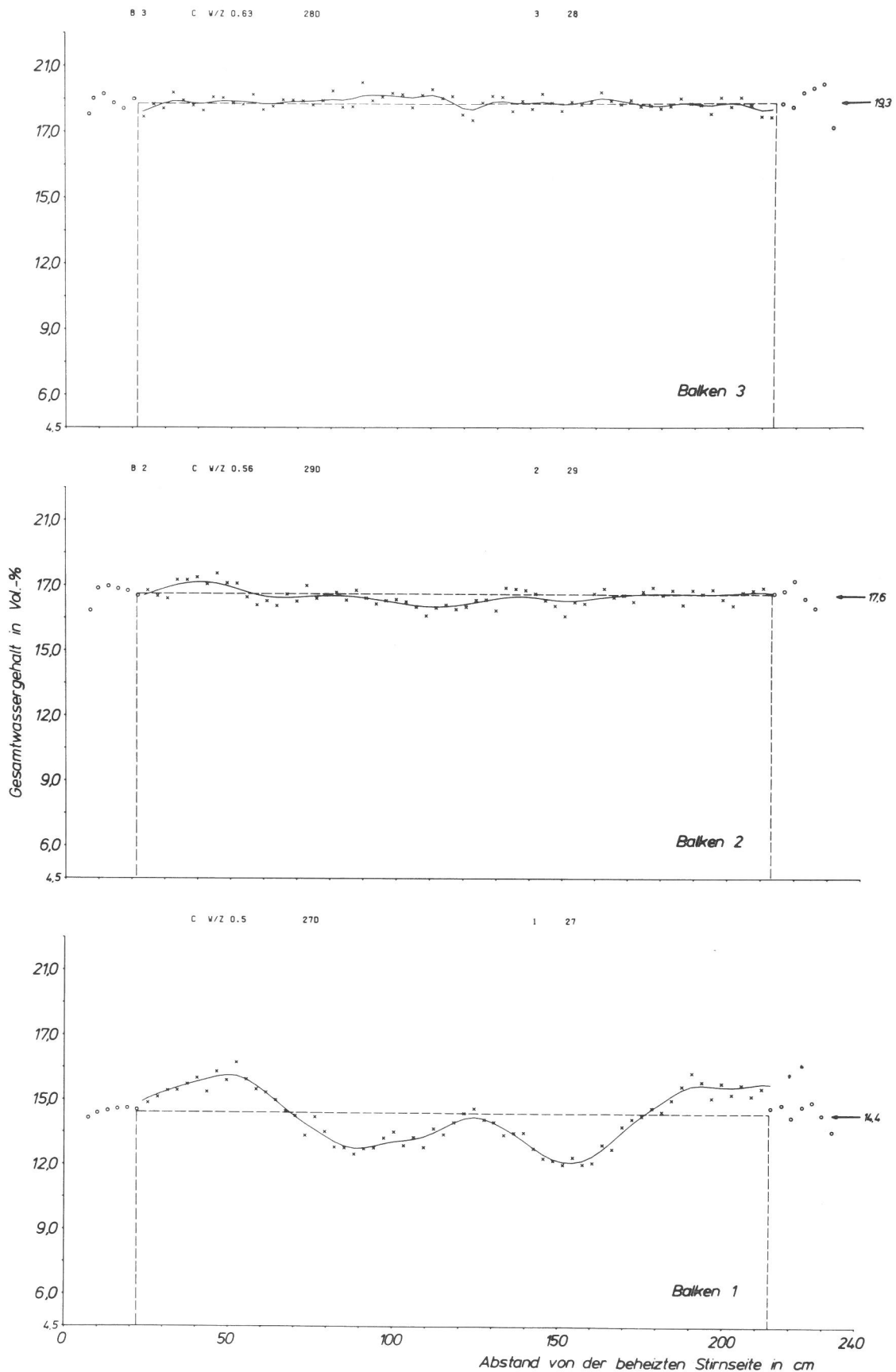


Bild 25
 Mit Hilfe der Neutronensonde an den Balken 1, 2 und 3 aufgenommene Verteilungsprofile des Gesamtwassergehaltes, aufgetragen im Zeichenautomaten nach Ausgleich der Meßwerte mit der kubischen Spline-Approximation (die Verzerrungen der Randbereiche wurden anhand der Mittelwerte des Gesamtwassergehaltes korrigiert)

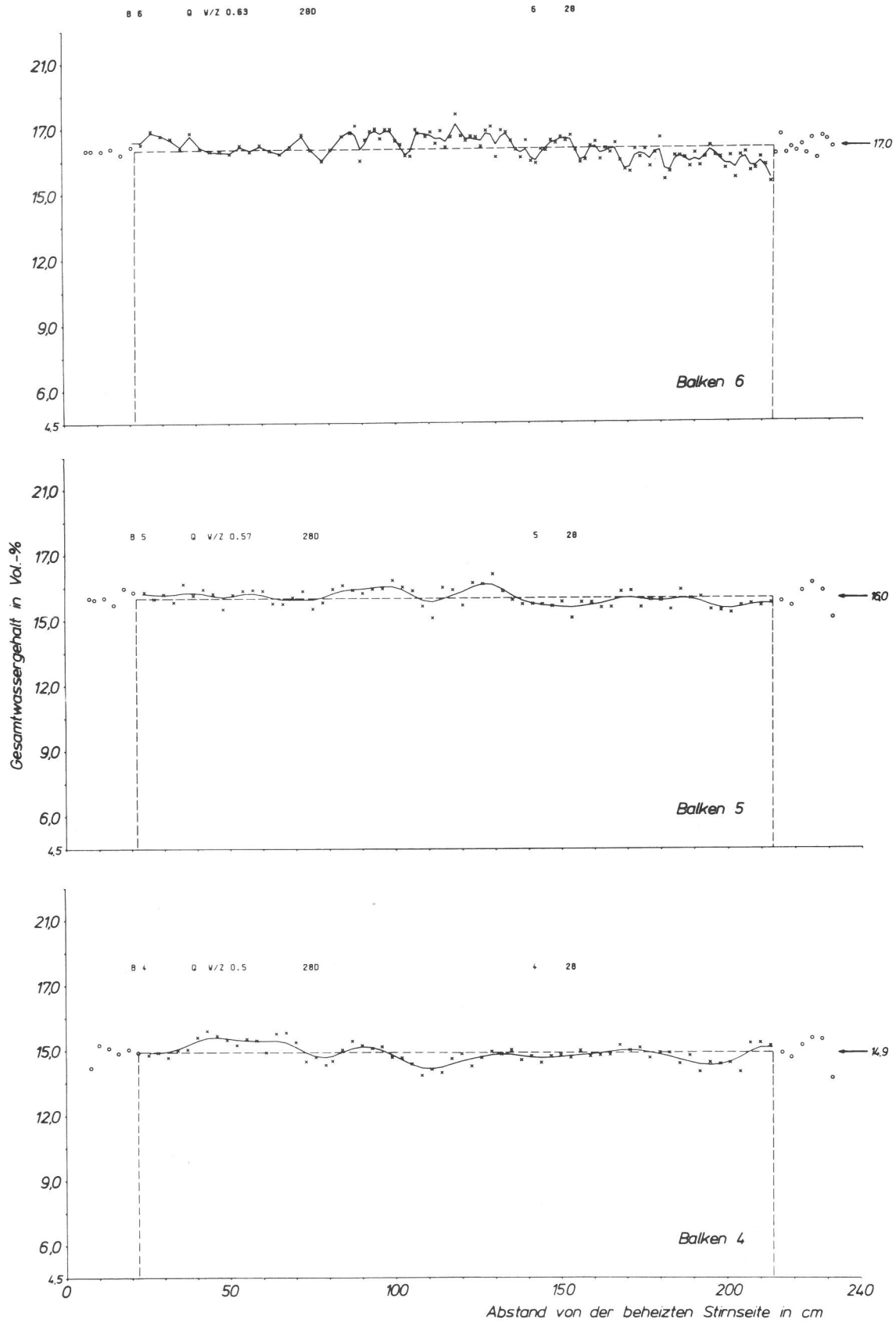


Bild 26
 Mit Hilfe der Neutronensonde an den Balken 4, 5 und 6 aufgenommene Verteilungsprofile des Gesamtwassergehaltes, aufgetragen im Zeichenautomaten nach Ausgleich der Meßwerte mit der kubischen Spline-Approximation (die Verzerrungen der Randbereiche wurden anhand der Mittelwerte des Gesamtwassergehaltes korrigiert)

lediglich die Veränderungen der Profile deutlich machen soll und keine Mittelwertlinie darstellt. Die durchgezogene Ausgleichskurve wurde auf der Rechenanlage mit der "kubischen Spline-Approximation" für jede gemessene Altersstufe ermittelt, einer Methode, bei der Polynome 3. Ordnung als Ausgleichskurven eingerechnet werden. Die ausgeglichenen Profile wurden mit Hilfe des Rechners analysiert, indem an 25 ausgewählten Ortskoordinaten die absolute Abweichung zum nächstjüngeren Profil sowie die relative Änderung gegenüber dem Profil für den 28. Tag errechnet und für jede Ortskoordinate ($\hat{=}$ Abstand von der beheizten Stirnseite) über die Zeit angetragen wurde. Als Beispiel ist für je 13 Ortskoordinaten der Gesamtwassergehalt (% des Wertes vor Heizbeginn am 28. Tag) in Abhängigkeit vom Betonalter in den Bildern 28 und 29 für die Balken 2 und 5 dargestellt. Die entsprechenden Zusammenfassungen für die übrigen Balken geben die Bilder A 13 bis 16 im Anhang.

Dieses Vorgehen bot den Vorteil, daß notwendige Korrekturen ohne Schwierigkeiten eingerechnet werden konnten; ferner erübrigte es sich, die durch die Geometrie der Versuchsanordnung be-

dingten Verzerrungen der Meßprofile in den Randzonen der Balken auszugleichen. Für die Darstellung in den Bildern A 1 bis 12 des Anhangs waren die prozentualen Anteile auf den jeweiligen Mittelwert der Messung am 28. Tag zu beziehen. Die durchgezogenen Kurven geben die Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter für die wichtigsten rechts im Bild angegebenen Ortskoordinaten wieder.

Neben Dichtestreunungen des Betons und geometrischen Einflüssen (vgl. (80)) beeinträchtigen vor allem auch systematische Fehler der Meßeinrichtung die Genauigkeit der Ergebnisse. Bild 30 zeigt Mittelwerte und Vertrauensbereiche für eine statistische Sicherheit von 95 %, die aufgrund von 4 unmittelbar nacheinander aufgenommenen und ausgeglichenen Meßprofilen für die zur Auswertung benutzten Ortskoordinaten berechnet wurden (81). Die Vertrauensbereiche lassen keine Ortsabhängigkeit erkennen, so daß die Streunungen aller Einzelwerte gemeinsam betrachtet werden konnten. Die Zuverlässigkeit der Messungen kann in erster Näherung anhand der ermittelten Standardabweichung von $s = \pm 0,3$ Vol.-% beurteilt werden.

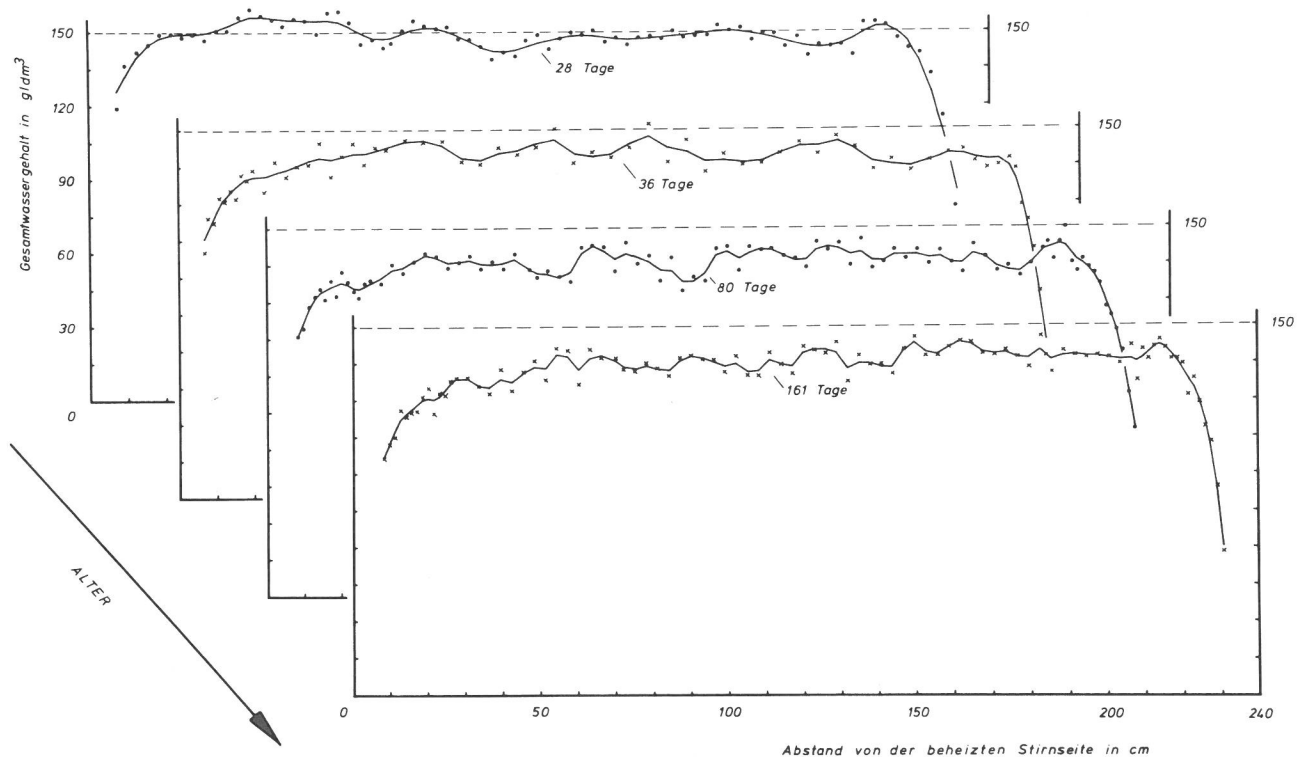


Bild 27

Mit der kubischen Spline-Approximation ausgeglichene Messungen des Gesamtwassergehaltes, aufgetragen über die Balkenlänge für verschiedene Altersstufen ohne Berücksichtigung der Randeinflüsse (das Meßprofil der beiden jüngeren Altersstufen ist im Vergleich zu den beiden älteren stärker geglättet)

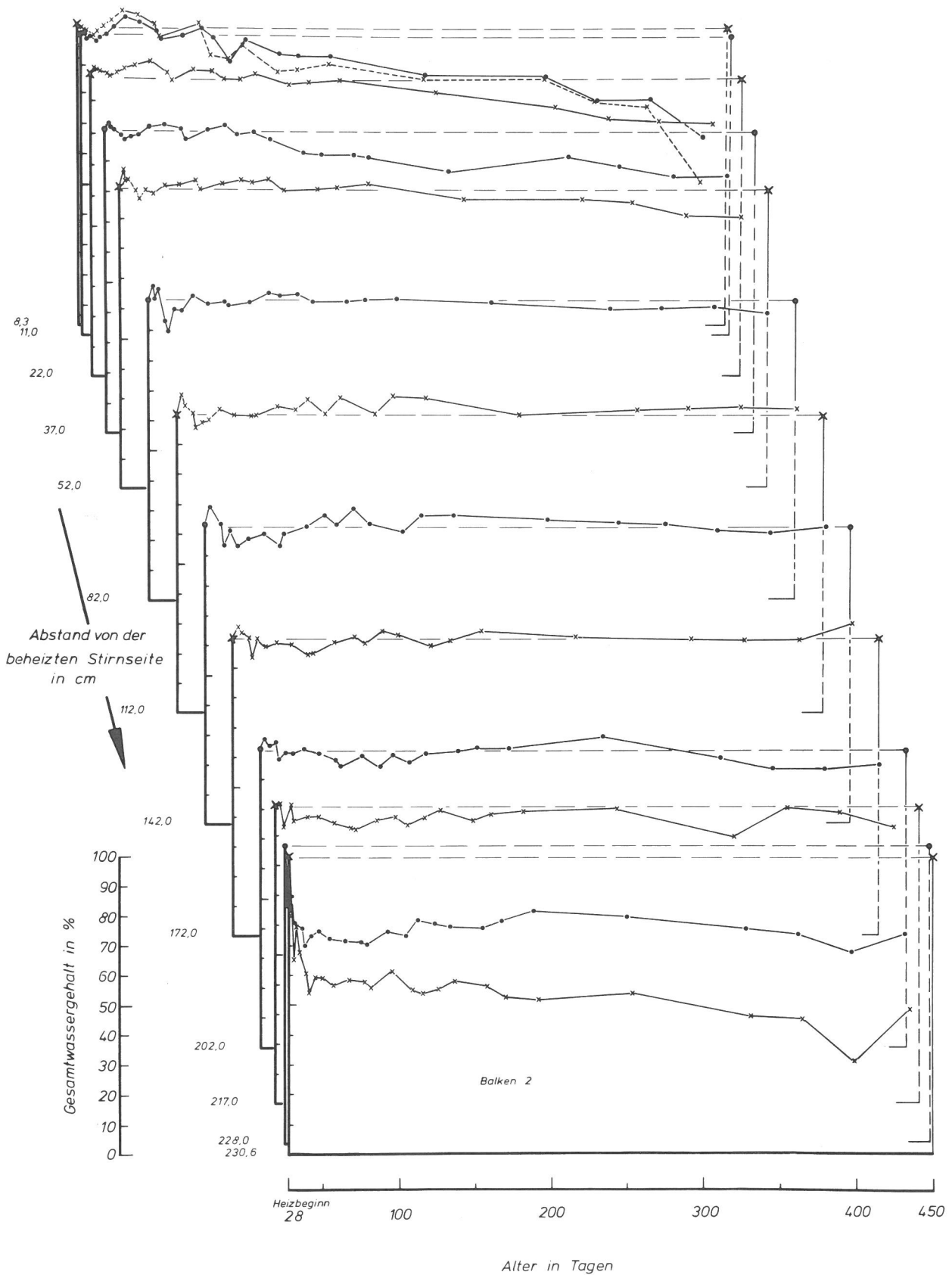


Bild 28
Entwicklung des Gesamtwassergehaltes (in Prozent des Ausgangswertes vor Heizbeginn) in Abhängigkeit vom Betonalter; angetragen für 13 Ortskoordinaten (Abstand von der beheizten Stirnseite) des Balkens 2 (siehe auch die Bilder A 13 und 14)

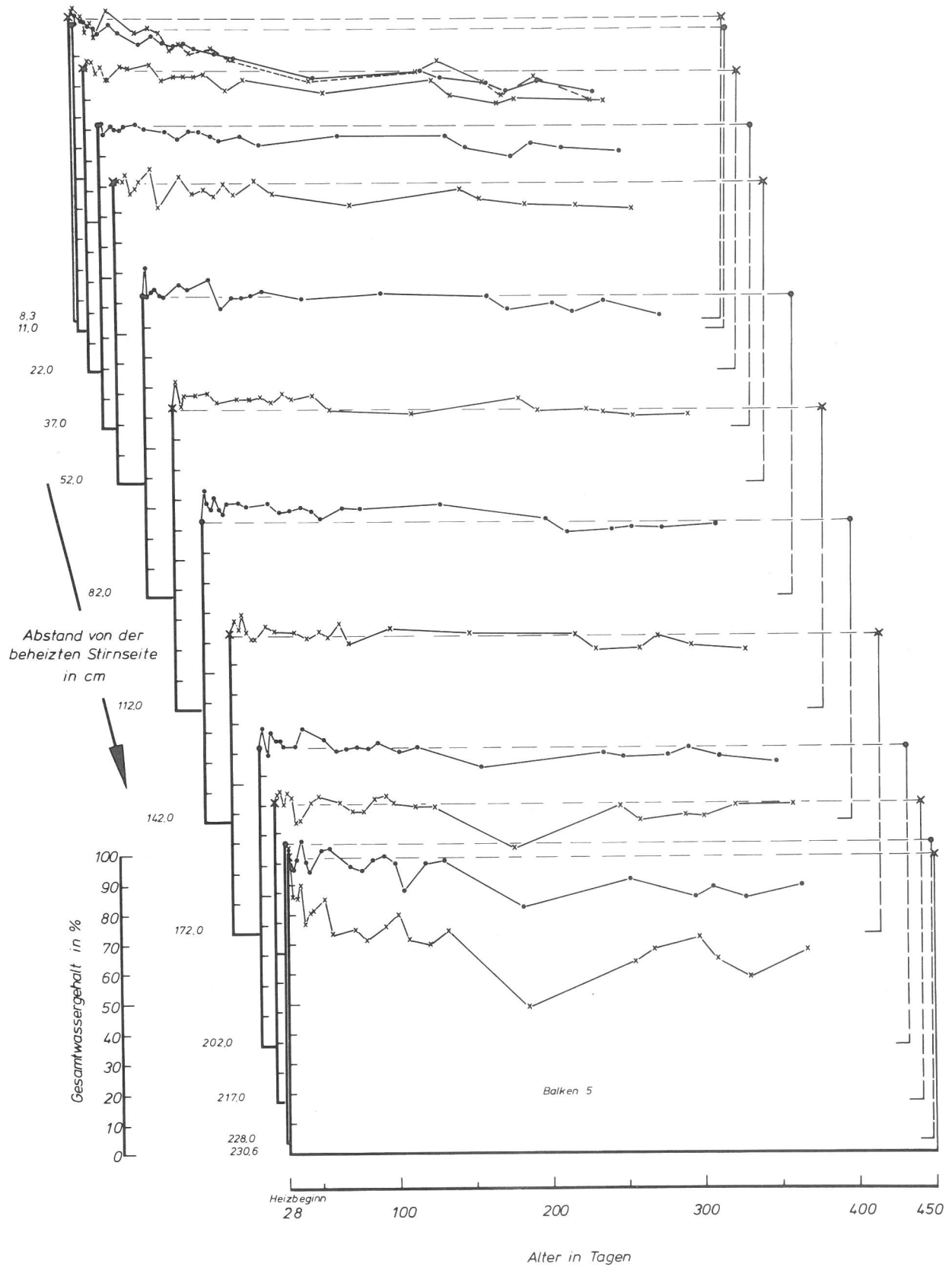


Bild 29
 Entwicklung des Gesamtwassergehaltes (in Prozent des Ausgangswertes vor Heizbeginn) in Abhängigkeit vom Betonalter; angetragen für 13 Ortskoordinaten (Abstand von der beheizten Stirnseite) des Balkens 5 (siehe auch die Bilder A 15 und 16)

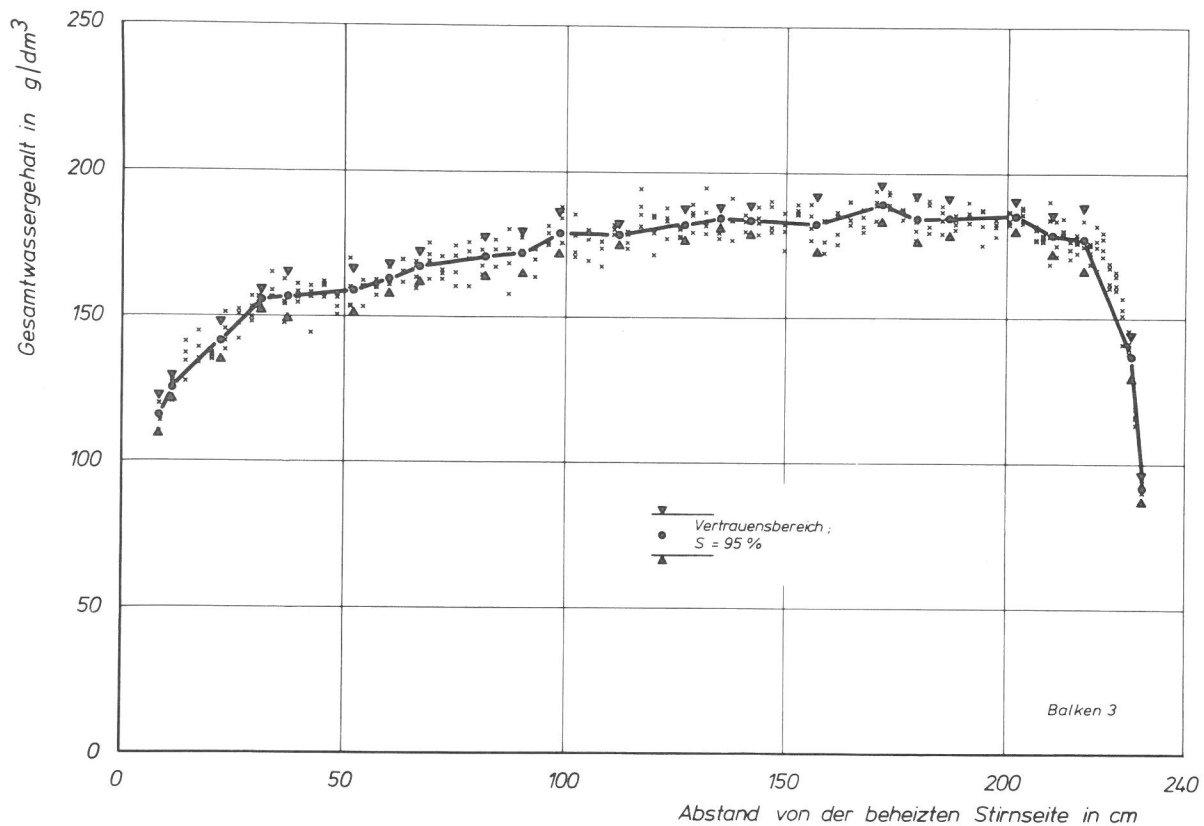


Bild 30

Vertrauensbereiche ($\pm t \cdot s / \sqrt{N}$) der Gesamtwassergehalte in g/dm^3 für eine statistische Sicherheit von 95 % bei $N = 4$ Messungen (Neutronenmethode Balken 3, ohne Berücksichtigung der Randeinflüsse)

2.2.4. Längenänderungen

2.2.4.1. Änderungen der Gesamtlänge der Balken

2.2.4.1.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Die Balken erfahren Volumenänderungen, deren zeitliche Entwicklung und Größe von den speziellen Eigenschaften des Zementsteins sowie der Zuschläge und von den thermisch-hygrischen Einflüssen abhängt. Insgesamt sind für die Volumenänderungen des Betons, von denen die Längenänderungen (Δl) bzw. Dehnungen (ϵ) in Richtung der Balkenlängsachse gemessen werden, Vorgänge verantwortlich, die als Schrumpfen, Schwinden und Quellen sowie als thermische Ausdehnung bezeichnet werden (vgl. auch Abschnitt 2.4.1).

Die zur Messung der Längenänderungen der Balken benutzte Vorrichtung besteht aus einem Invarstab mit einem Durchmesser von 25 mm, an dessen einer Stirnfläche eine Stahlkugel eingeschlagen ist, während am anderen Ende zwei Feintaster ($1 \mu\text{m}$ pro Skalenteil) an einem Joch befestigt sind (vgl. Bild 3). Der Stab trägt mehrere im Abstand von 30 cm über die Länge angeordnete PVC-Ringe, die ihn bei der Messung in den Glasrohren der Balken zentriert halten. Um die Aufnahme von Wärme aus dem Beton mög-

lichst gering zu halten, ist der Stab zwischen den Ringen mit Schaumstoff umwickelt. Nach dem Einschieben in das Glasrohr berührt das Stabende mit der Kugel die senkrecht zur Balkenlängsachse angeordnete Anschlagplatte. Diese ist ca. 3 cm vom Balkenende entfernt und - zwecks sicherer Fixierung im Beton - auf der das Glasrohr am Außendurchmesser überkragenden Abschlußplatte befestigt. Die beiden Feintaster drücken dabei gegen zwei der vier kreuzweise an der freien Stirnseite des Balken angebrachte Nippel, die ebenfalls Anschlagkugeln tragen und in Ankerhülsen verstellbar eingeschraubt sind. Durch das paarweise Messen an zwei gegenüberliegenden Bezugsstellen werden Verschiebungen der Stabachse gegenüber der Rohrlängsachse weitgehend ausgeglichen.

Zur Überprüfung und Aufbewahrung des Meßstabes dient ein mit Polystyrolschaum als Wärmedämmung und Schutzmantel umhülltes Stahlrohr, das ebenso wie das Glasrohr eine Anschlagplatte und am Rohreingang zwei auf einer Stahlplatte fixierte Nippel trägt.

Vor der Durchführung der Messungen wurde jeweils zunächst der Meßstab im Stahlrohr überprüft. Im Anschluß daran erfolgte die Längenmessung eines Balkens, wobei die Feintaster an jedem Nippelpaar zweimal angesetzt wurden (ins-

gesamt je Messung 8 Einzelwerte). Die jeweils erste Messung nach dem Betonieren der Balken lag zwischen dem 1. bis 4. Tag. Die Längenänderungen wurden als Differenzen zweier aufeinander folgender Messungen errechnet.

2.2.4.1.2. Meßergebnisse

In den Bildern 31 und 32 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Invarstab an den Balken 1, 2 und 3 sowie 4, 5 und 6 zusammengestellt. Sie zeigen die Gesamtlängenänderungen (Δl) der Balken in Abhängigkeit vom Alter des Betons, die auf den Wert bei Heizbeginn am 28. Tage bezogen wurden.

Bei Berücksichtigung der Länge der Balken wies das Meßverfahren eine verhältnismäßig hohe Empfindlichkeit auf. Die Standardabweichung bezogen auf die Einzelmesswerte betrug $s = +6,8 \mu\text{m}$. Bei einer statistischen Sicherheit von 95% ergab sich für die jeweils zu einem Mittelwert gehörenden Einzelwerte ein Vertrauensbereich (81) von $t \cdot s / \sqrt{N} = + 5,7 \mu\text{m}$.

2.2.4.2. Lokale Längenänderungen im Beton

2.2.4.2.1. Meßverfahren, -anordnung und -durchführung

Die mit dem Invarstab gemessenen Gesamtlängenänderungen der Balken sind auf Vorgänge zurückzuführen, die von den jeweils im Beton herrschenden Temperatur- und Feuchtebedingungen sowie vom Alter des Betons abhängen. Um auch die örtlich unterschiedlichen Dehnungen im Balken erfassen zu können, wurden in 8 Meßebenen Dehnungsgeber entsprechend Bild 5 angeordnet. Die Geber (Bild 33), die als sogenannte Innengeber für Messungen in Beton in der Bundesanstalt entwickelt und angefertigt wurden, bestehen aus einem handelsüblichen Dehnungsmeßstreifen auf Phenolharzträger mit 60 mm Meßgitterlänge, der zwischen zwei 0,1 mm dicken Federstahlfolien unter Druck geklebt und bei einer Temperatur von 180 °C ausgehärtet wurde. Um das Eindringen von Feuchtigkeit sicher zu verhindern, sind die Ränder des Gebers rundum mit einer Lötnaht verschlossen. Die Anschlüsse des Dehnungsmeßstreifens an den Meßleitungen befinden sich in einem senkrecht aufgelöteten Kupferrohr, das mit einer Feuchtigkeitsdichtmasse gefüllt und mit einem schnell härtenden Kleber an der Oberseite geschlossen wurde. Alle Geber wurden durch mehrfache Temperaturwechsel zwischen 20 und 80 °C im Wärmeschrank zum Zwecke der Stabilisierung gealtert.

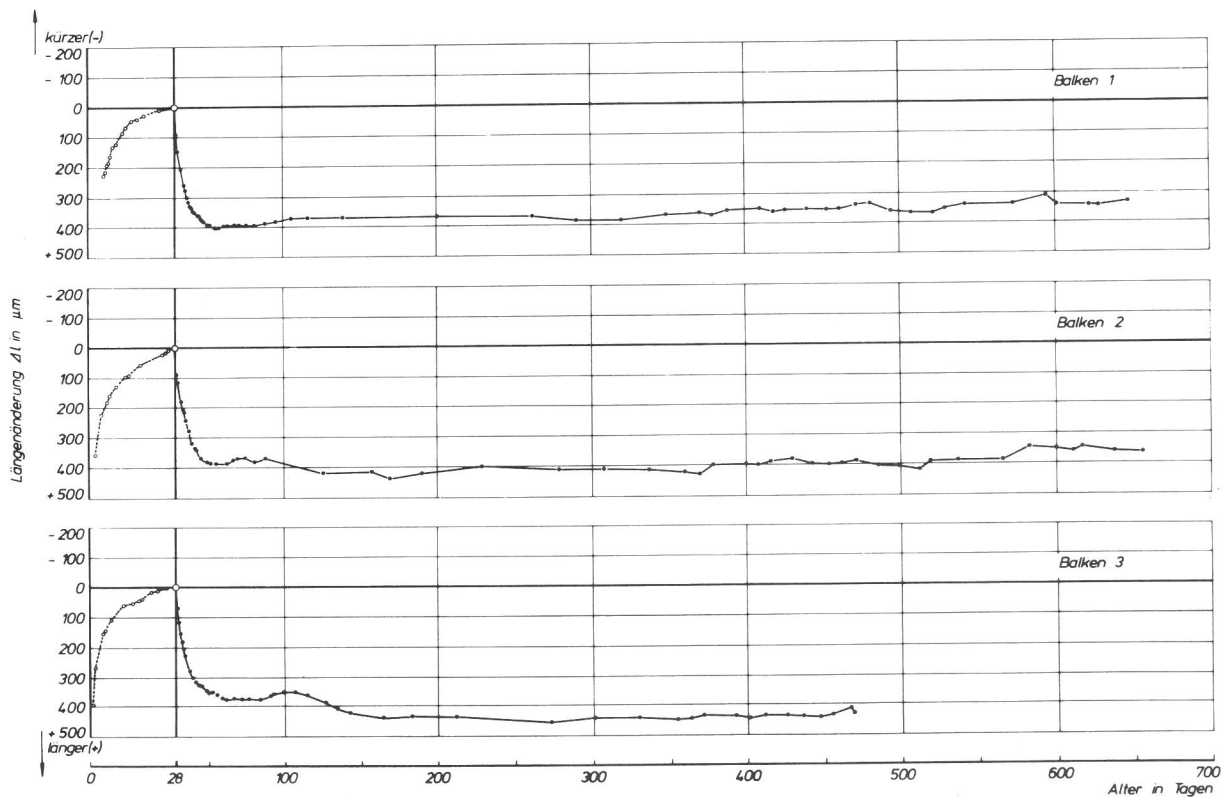


Bild 31
Änderungen der Gesamtlängen (Δl) der Balken 1, 2 und 3 aus calcitischem Beton in Abhängigkeit vom Alter (Bezugswert: Heizbeginn am 28. Tag)

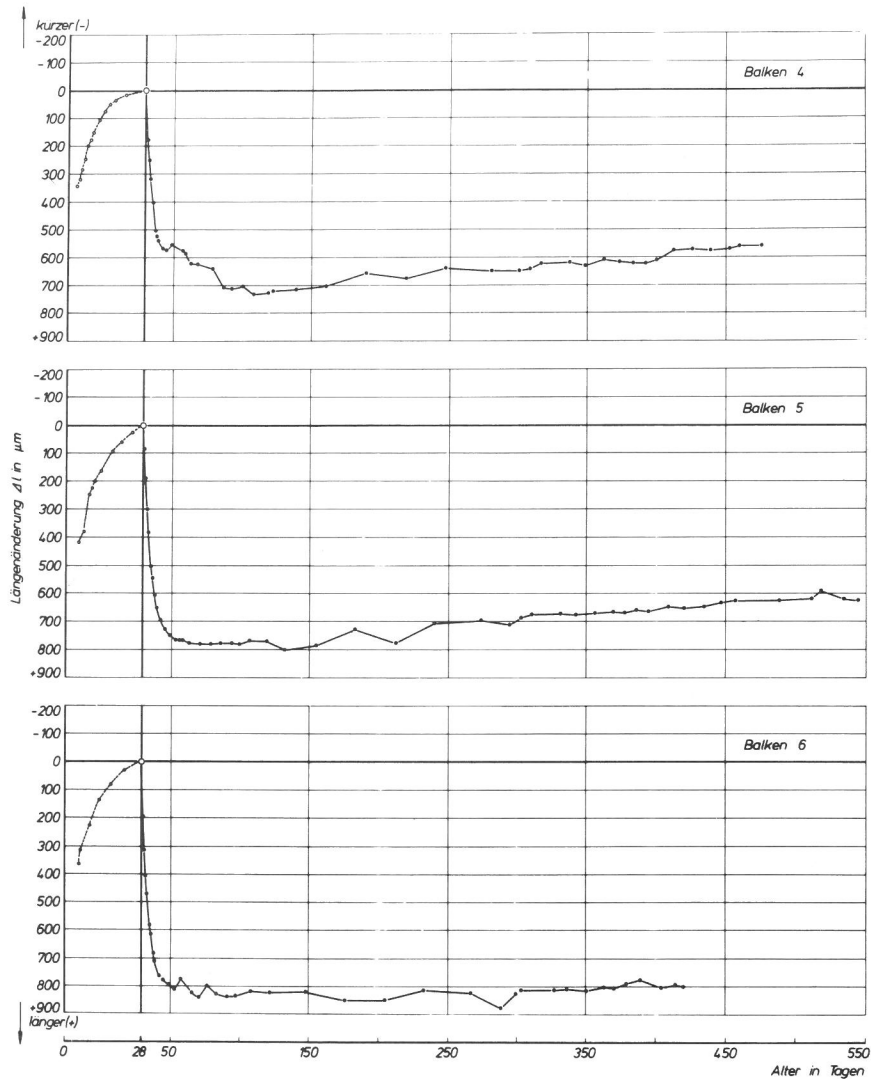


Bild 32
 Änderungen der Gesamtlängen (Δl) der Balken 4, 5 und 6 aus Kiessand-
 Beton in Abhängigkeit vom Alter (Bezugswert: Heizbeginn am 28. Tag)

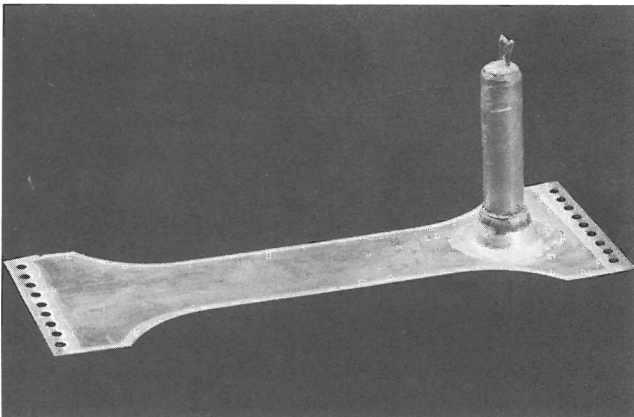


Bild 33
 Ansicht des Gebers für die Messung der lokalen Längenänderungen im
 Beton, bestehend aus einem 60 mm langen Gitter-DMS zwischen zwei
 Federstahlfolien

Die Geber sind parallel zur Balkenlängsrichtung etwa in Höhe des Glasrohres im Beton (Bild 8) eingesetzt, wobei jedem aktiven Geber ein passiver Geber, der sich auf der Balkenoberseite unbehindert verformen kann, in Halbbrückenschaltung zugeordnet wurde. Mit Hilfe dieser Anordnung werden insbesondere auch Nullpunktverschiebungen der Geber infolge Alterung weitgehend kompensiert. Als Meßgerät stand ein manueller Kompensator (Empfindlichkeit: 1 Skalenteil $\hat{=}$ 1 $\mu\text{m}/\text{m}$) mit 4 Meßstellen zur Verfügung.

Für die nachfolgend erläuterten Messungen der Dehnungen infolge Schrumpfung und Schwindens ($\epsilon_{[S*J]}$) bis zum Heizbeginn am 28. Tage wurden die Kennlinien der Geber mit Hilfe von Dehnungsmessungen unter Zugbelastung ermittelt. Die aus diesen Messungen abgeleiteten Steifigkeitswerte dienen zur rechnerischen Abschätzung des Temperaturanges im Beton. Für die beiden Betonar-

ten ergaben sich Faktoren ($\delta_{B2} = 6,28 \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ für den calcitischen und $\delta_{B5} = 1,49 \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ für den Kiessand-Beton), mit denen anhand der Temperaturänderungen gegenüber dem Bezugswert am 28. Tage Korrekturglieder berechnet werden konnten, die das unterschiedliche elastische Verhalten von Dehnungsgeber und Betonen berücksichtigte. Bei der Überprüfung eines Geberpaares, dessen aktiver Geber sich in einem Probekörper befand, wurde nach Trocknung des Betonbalkens im Temperaturbereich zwischen 25 und 75 °C ein entsprechendes, lineares Verhalten nachgewiesen.

Mit den Dehnungsmessungen konnte nach dem Aufbringen der Wärmedämmung und des Schaldeckels begonnen werden. Über die Messungen nach Heizbeginn, bei denen aufgrund der Trocknung des Betons vor allem auch Schwindverkürzungen zu erwarten waren, kann erst nach Abschluß aller Untersuchungen und nach dem Spalten der Balken 1 und 2 sowie 4 und 5 berichtet werden.

2.2.4.2.2. Meßergebnisse

Die in Abhängigkeit vom Alter ermittelten Dehnungen wurden nach Berücksichtigung des Temperatureinflusses jeweils für den calcitischen und den Kiessand-Beton zusammengefaßt. Die aus den Mittelwerten für die jeweils drei Balken entwickelten Kurven sind im rechten Teil des Bildes 34 dargestellt (\diamond - Symbole). Sie schließen an die Kurvenzüge für das Schrumpfen bzw. Schwinden während der ersten Tage nach dem Betonieren an. Über diese Messungen wird in Abschnitt 2.4.1 berichtet.

2.2.5. Abschließende Messungen an Betonproben aus den Balken 3 und 6

2.2.5.1. Probekörper, Umfang und Durchführung der Messungen

Während die Balken 1, 2, 4 und 5 über eine Zeit von insgesamt 3 Jahren beheizt werden sollen, wurden die Untersuchungen an den Balken 3 und 6 bei einem Betonalter von 470 bzw. 421 Tagen abgebrochen, um mit Hilfe von gravimetrischen Bestimmungen des Feuchtigkeitsgehaltes an Proben der Balkenbetone die Zuverlässigkeit der Messungen mit den Feuchtemeßelementen und der Neutronensonde überprüfen zu können. Ferner wurden Proben zur Untersuchung des Gehaltes an nicht verdampfbarem Wasser sowie der Trockenrohddichte herangezogen. Darüber hinaus war es notwendig, in Ergänzung zu den Festigkeitsuntersuchungen an gesondert hergestellten Würfeln (vgl. Abschnitt 2.4.2) Druckfestigkeitsprüfungen an aus dem Balkenbeton entnommenen Bohrkernen durchzuführen.

Nach abschließenden Messungen an den Balken 3 und 6 wurden die Regler der Heizung abgeschal-

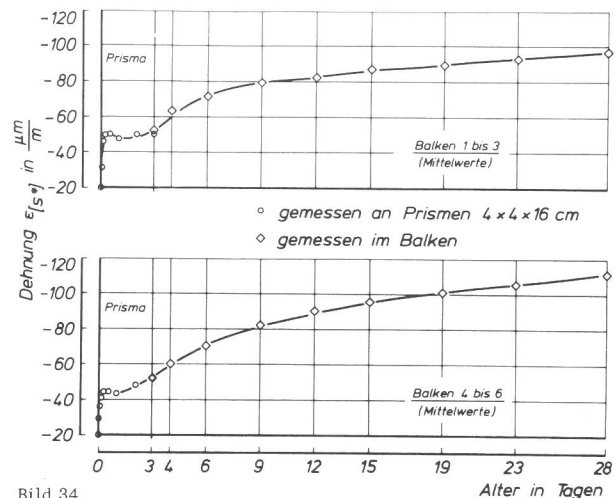


Bild 34

Dehnungen infolge Schrumpfen und Schwindens ($\epsilon_{[s^*]}$) des calcitischen Betons (Balken 1 bis 3) und des Kiessand-Betons (Balken 4 bis 6) bis zum Heizbeginn am 28. Tag

tet, die Energieversorgung unterbrochen und unmittelbar danach die Schalung und Wärmedämmung von den Balken entfernt, so daß der Beton nur noch von der Dampfsperre ummantelt war. Beim Abreißen der Kupferfolie der Dampfsperre blieb die Epoxidharzschicht auf dem Beton haften, was deutlich an den glatten Außenflächen der in Bild 35 abgebildeten Hälfte eines Balkenabschnittes erkennbar ist. Die Abschnitte wurden durch Spalten der Balken in den durch die Meßgitter gebildeten Ebenen unter Verwendung von Schneiden mit Hilfe einer Druckprüfmaschine gewonnen und unmittelbar danach vertikal halbiert (vgl. auch Bild 4). Die eine Hälfte diente später zur Entnahme je eines Bohrkernes mit dem Durchmesser 10 cm aus dem oberen und dem unteren Viertel. (Die beiden im Bild ebenfalls erkennbaren Bohrkern mit Durchmessern von 5 cm werden zu den in dieser Arbeit nicht behandelten Untersuchungen auf Luftdurchlässigkeit verwendet.) Aus der anderen Abschnittshälfte wurde Probematerial zur Bestimmung des Gehaltes an verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser entnommen, wobei je eine Probe aus dem oberen und dem unteren Viertel und das Probematerial für die Bestimmung der Trockenrohddichte aus der Mitte etwa in Höhe des Glasrohrestammten. Diese Arbeiten wurden schnell durchgeführt, um Feuchtigkeitsverluste möglichst klein zu halten.

Die zwischen 2 und 3 kg schweren Proben wurden sofort gewogen, zerkleinert, bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und erneut gewogen. Die Bestimmung der Trockenrohddichte an Probestücken erfolgte nach DIN 52 102 (5); die gleichen Proben dienten zur Messung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck gemäß DIN 52 103 (6). Zu Vergleichszwecken wurde an gesondert hergestellten Probekörpern der calcitischen und der Kiessand-Betone ebenfalls die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und bei einem Druck von 150 bar ermittelt.

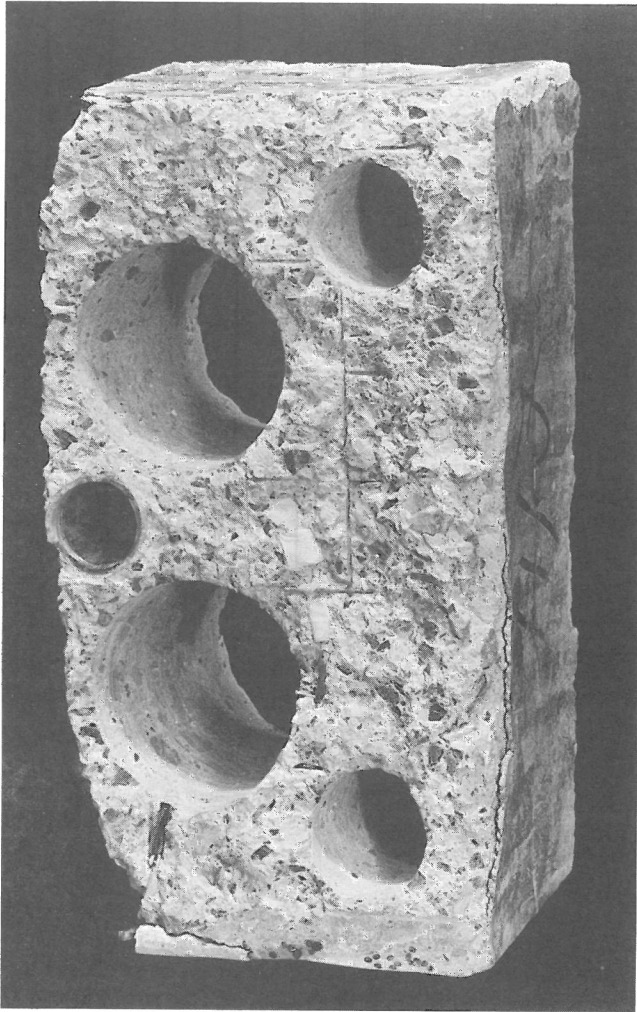


Bild 35
Teilansicht eines durch Spalten gewonnenen Balkenabschnittes nach der Entnahme von Bohrkernen; links in halber Höhe Reste des in der Längsachse des Balkens angeordneten Glasrohres

Die Untersuchung auf den Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser durch Wärmebehandlung bei 550°C des zuvor bei 105°C getrockneten Betons erfolgte an je zwei Proben von ca. 300 g aus den Balkenabschnitten A/B, C/D, F/G, J/K, O/P und P/Q.

Die Bohrkern für die Bestimmung der Druckfestigkeit wurden so gekürzt und an den Druckflächen planparallel abgeglichen, daß sich Durchmesser und Höhe annähernd entsprachen. Sie lagerten bis zur Gewichtskonstanz bei 20°C und 100% rel. Feuchte, bevor sie - in oberflächentrockenem Zustand - geprüft wurden.

2.2.5.2. Meßergebnisse

In Bild 36 sind die gemessenen Gehalte an verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser (anhand der Trockenrohdichten umgerechnet auf Vol.-%) in Abhängigkeit von der Lage der Betonabschnitte in den Balken 3 und 6 aufgeführt. Die

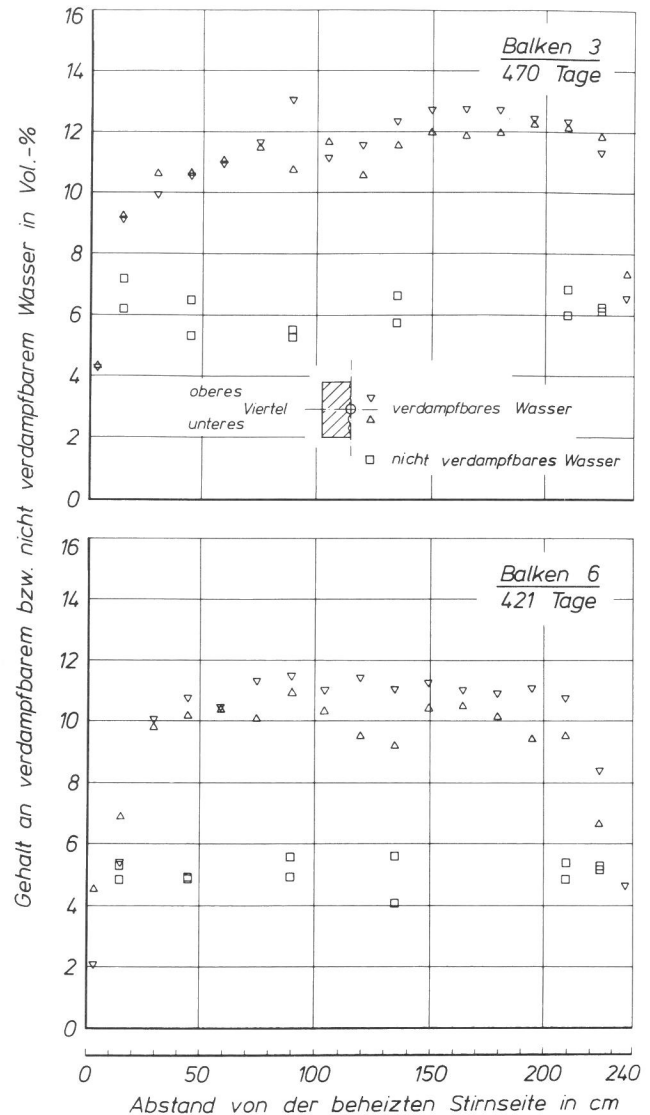


Bild 36
Gehalt an verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser von Betonproben aus den Abschnitten der Balken 3 (calcitischer Beton) und 6 (Kies sand-Beton)

Mittelwerte der jeweils zwei Messungen wurden zum Aufstellen der Wasserbilanzen für die beiden Balken in Abschnitt 2.5 benutzt.

Die Trockenrohdichten (ρ_{tr}) fanden bei der Aufstellung des oberen Teiles der Tabelle 4 Verwendung; sie ließen keine lagebedingten Abhängigkeiten erkennen. Ergänzend zu den Mittelwerten ist die Standardabweichung (s) angegeben.

Die an Probestücken der Balken 3 und 6 ermittelten Wasseraufnahmen unter Atmosphärendruck (A) zeigt Bild 37 links in Abhängigkeit von ihrer Lage im Balken. In Bild 37 rechts sind die Wasseraufnahmen bei Atmosphärendruck (A_{γ}) und bei einem Druck von 150 bar (A_{dr}) dargestellt, die an gesondert hergestellten Probekörpern aller Betone ermittelt wurden.

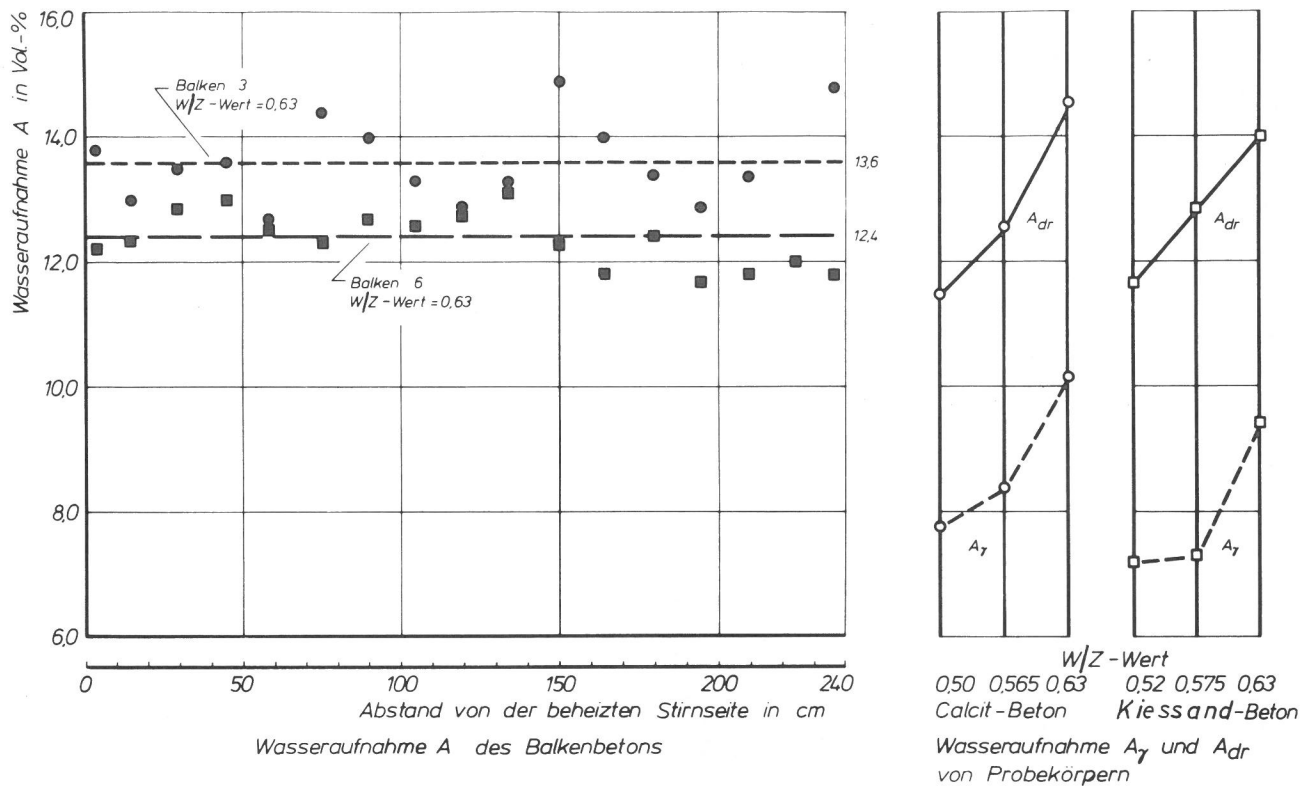


Bild 37
links - Wasseraufnahme (A) von Betonproben aus den Abschnitten der Balken 3 und 6, aufgetragen über die Balkenlänge

rechts - Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck (A_γ) und bei Druck von 150 bar (A_{dr}) von gesondert hergestellten Probekörpern der calcitischen und der Kiessand-Betone

Im Bild 38 sind die an den herausgebohrten zylindrischen Probekörpern gemessenen Druckfestigkeiten (β_D) in Abhängigkeit von ihrer Lage im Balken aufgeführt. Dabei wurde der Einfluß von Gestalt und Abmessungen der Probekörper nicht berücksichtigt.

2.3. Untersuchungen zur Gefügeentwicklung des Betons

2.3.1. Entwässerungsversuche an Zementstein

2.3.1.1. Meßverfahren und Durchführung der Versuche

Nach Powers und Brownard (14) ist das im Zementstein vorhandene Wasser nach drei verschiedenen Bindungsarten zu unterscheiden, und zwar als freies, adsorptiv gebundenes und chemisch gebundenes Wasser (vgl. Abschnitt 1.1.3). Die unter Zugrundelegung definierter Versuchsbedingungen vorgenommene Einteilung in verdampfbares und nicht verdampfbares Wasser setzt voraus, daß das nicht verdampfbare annähernd dem chemisch gebundenen Wasser gleichgesetzt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Terminologie von Powers übernommen, indem vereinfachend der durch Trocknung bei 105 °C austreibbare Anteil als verdampfbares Wasser und der zwischen 105 und 550 °C abgegebene Anteil

als nicht verdampfbares Wasser bezeichnet wird. Das von den meisten Autoren zur Bestimmung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser herangezogene Verfahren der Trocknung im Wärmeschrank bei Temperaturen etwas oberhalb des Siedepunktes (vgl. auch (18, 28, 63)) erfaßt im Sinne der Unterscheidung nach Powers neben dem freien einen Teil des adsorptiv an den Porenwänden gebundenen Wassers, und zwar je nach der Trocknungstemperatur, der Trocknungszeit und der Vorbehandlung des Probematerials. Wie Versuche gezeigt haben (82), ist auch unter scharfen Trocknungsbedingungen der Gewichtsverlust nicht nur bestimmten Temperaturbereichen zuzuordnen, sondern verläuft kontinuierlich, was vor allem dadurch begründet ist, daß die Absorptionskräfte, die die Wassermoleküle schichtartig binden und die beim Trocknen überwunden werden müssen, mit abnehmender Entfernung des Moleküls von der Porenwand wachsen. Trotz der Unsicherheit, mit der die Methode behaftet ist, wird sie in den meisten Fällen - wie auch hier - eingesetzt, um den versuchstechnischen Aufwand nicht unnötig zu vergrößern. Demgegenüber muß die von Powers und Brownard erstmals benutzte und von Copeland und Hayes (26) verfeinerte Methode zur Bestimmung des chemisch gebundenen Wasser ($\hat{=}$ nicht verdampfbares Wasser) speziellen Untersuchungen vorbehalten bleiben (25). Bei den nachfolgend beschriebenen Versuchen an Zementsteinproben wurde das zur Unterscheidung von verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser verwendete

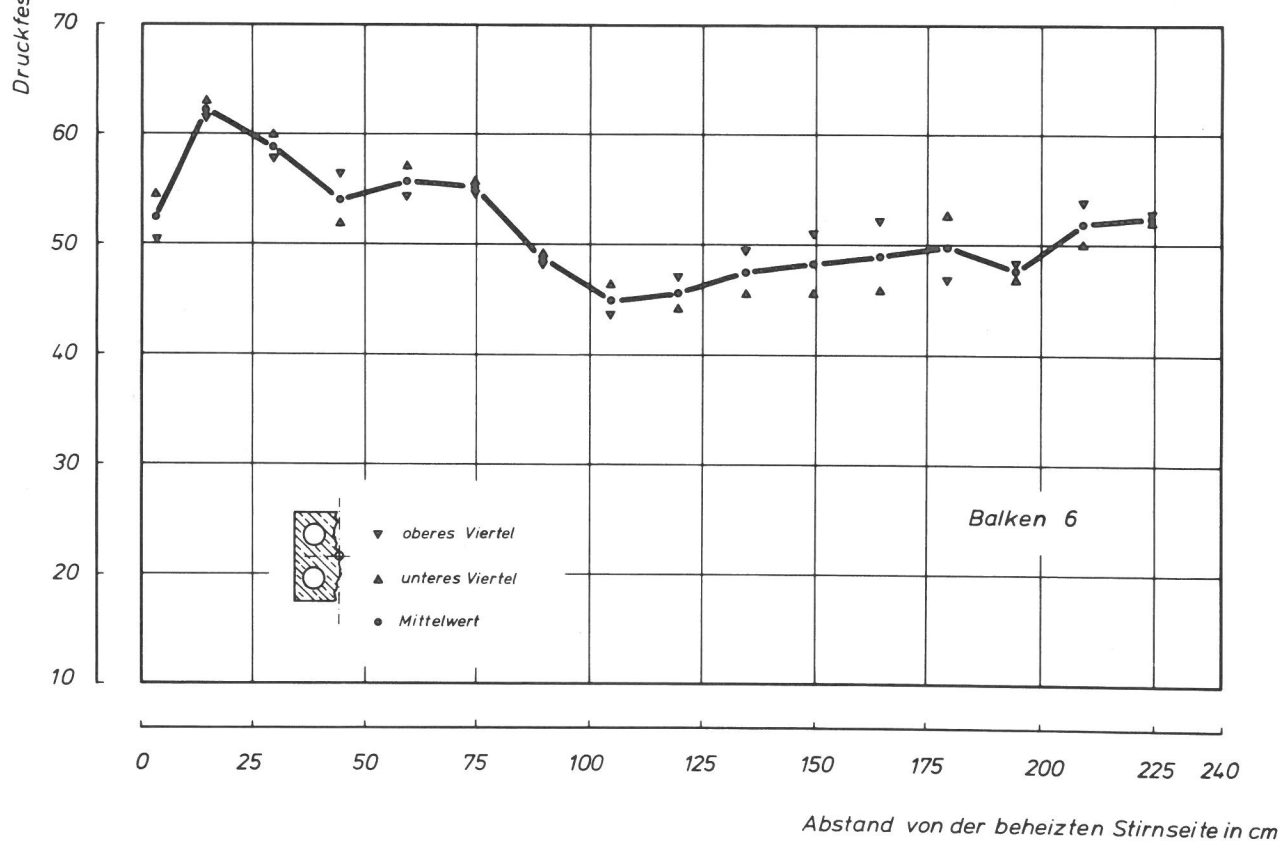
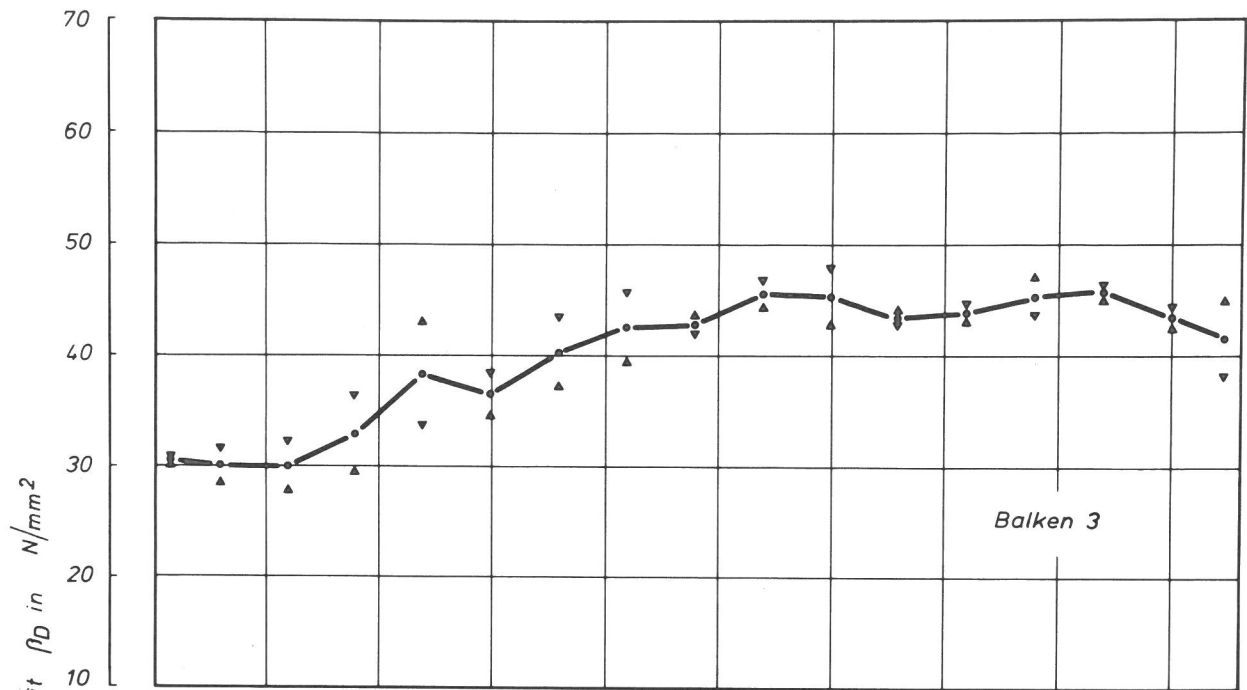


Bild 38
 Druckfestigkeit (β_D) von Bohrkernen (Durchmesser und Höhe 10 cm) aus den Abschnitten der Balken 3 und 6, aufgetragen über die Balkenlänge

te Verfahren der Wärmebehandlung bei 105 bzw. 550 °C den Ergebnissen der thermogravimetrischen Analyse (TGA) gegenübergestellt. Als Versuchsmaterial dienten die bis zum Meßbeginn in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung gelagerten Prismen (vgl. Abschnitt 2.1.1.4). Um porenraumspezifische Unterschiede erfassen zu können, die das Entwässerungsverhalten beeinflussen, wurde Zementstein mit W/Z - Werten zwischen 0,20 und 0,55 bei Zwischenstufen von 0,05 sowie verschiedenen Alters zwischen 3 und 290 Tagen untersucht.

Das Versuchsmaterial wurde jeweils aus dem Inneren der Zementsteinprismen entnommen. Für die Versuche im Wärmeschrank dienten je W/Z-Wert und Altersstufe zwischen 20 und 40 g des Zementsteins. Nach der Wägung wurde das Probenmaterial zerkleinert, bei 105 °C 48 Stunden lang getrocknet und wiederum gewogen. Danach erfolgten die Wärmebehandlungen bei 550 °C und schließlich bei 1000 °C mit den entsprechenden Wägungen. Die Wassergehalte bezogen auf die jeweilige Trocknungstemperatur (\tilde{w}^*) ergaben sich aus der Differenz zum Endgewicht bei 1000 °C:

$$w(\tilde{w}^*) = \left(\frac{G_{\tilde{w}^*} - G_{1000}}{G_{1000}} \right) \cdot 100 \text{ in Gew. -\%}$$

Die thermogravimetrischen Untersuchungen erfolgten an Proben des Zementsteines für die W/Z-Werte 0,3, 0,4 und 0,5 bei Altersstufen zwischen 1 und 290 Tagen. Aus dem zerkleinerten Versuchsmaterial wurde die Korngruppe 0,63 / 1,0 mit Prüfsieben nach DIN 4188 (4) abgetrennt und jeweils 200 mg davon als Probenmaterial verwendet. Die Aufheizgeschwindigkeiten waren aufgrund von Vorversuchen innerhalb der Temperaturbereiche folgendermaßen festgelegt worden:

Temperaturbereich (°C)	Aufheizgeschwindigkeit (°C/min)
20 / 200	2
200 / 380	100
380 / 540	5
540 / 700	2

Bei der Auswertung wurden die Gewichtsabnahmekurven (vgl. Bild 39) so in Intervalle geteilt, daß diese charakteristische Entwässerungsvorgänge, die die mehr kontinuierlichen Veränderungen überlagerten, einschlossen. Die Berechnung der Wassergehalte zu den den Intervallgrenzen entsprechenden Temperaturen erfolgte nach der oben genannten Beziehung, wobei das Endgewicht bei 700 °C als Bezugswert diente.

2.3.1.2. Meßergebnisse

Bild 39 zeigt am Beispiel einer Zementsteinprobe des W/Z-Wertes 0,50 die Abhängigkeit der Gewichtsabnahme von der Temperatur, wobei die unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten zu beachten sind. In der Gewichtsabnahmekurve sind die bei der Auswertung dieser Diagramme benutzten Intervallgrenzen durch Kreise markiert worden, die mit den lotrecht darunter liegenden Temperaturen korrespondieren.

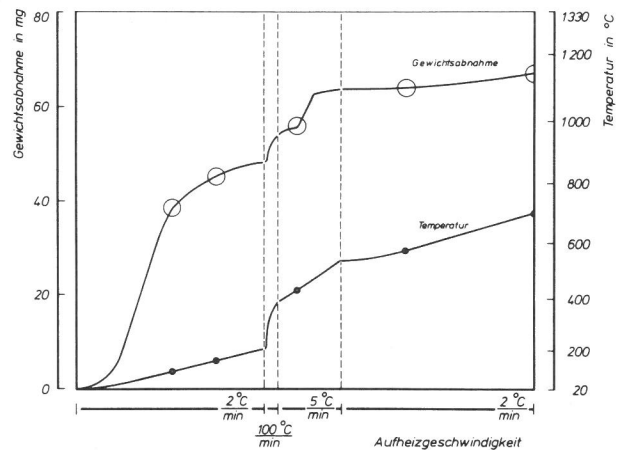


Bild 39

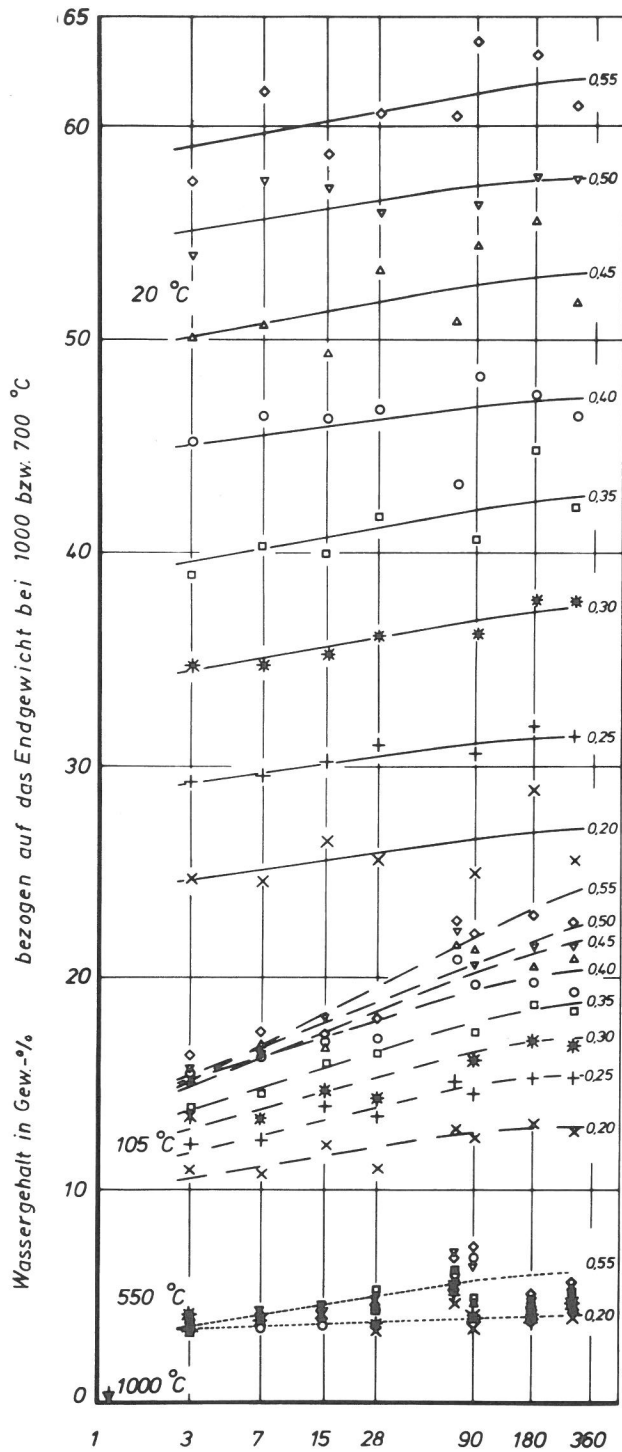
Thermogravimetrische Untersuchung von Zementstein: Temperatur und Gewichtsabnahme in Abhängigkeit von der Aufheizgeschwindigkeit (Einwaage 200 mg)

In Bild 40 sind die Ergebnisse der Messungen, ausgedrückt als Wassergehalte des Zementsteines bei den jeweiligen Temperaturen, in Abhängigkeit vom Alter zusammengestellt. Bild 40 links zeigt die mittels Wärmebehandlung bestimmten Wassergehalte; Bild 40 rechts gibt die bei der Auswertung der Diagramme entsprechend Bild 39 gewonnenen Ergebnisse wieder, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Einzelwerte verzichtet wurde.

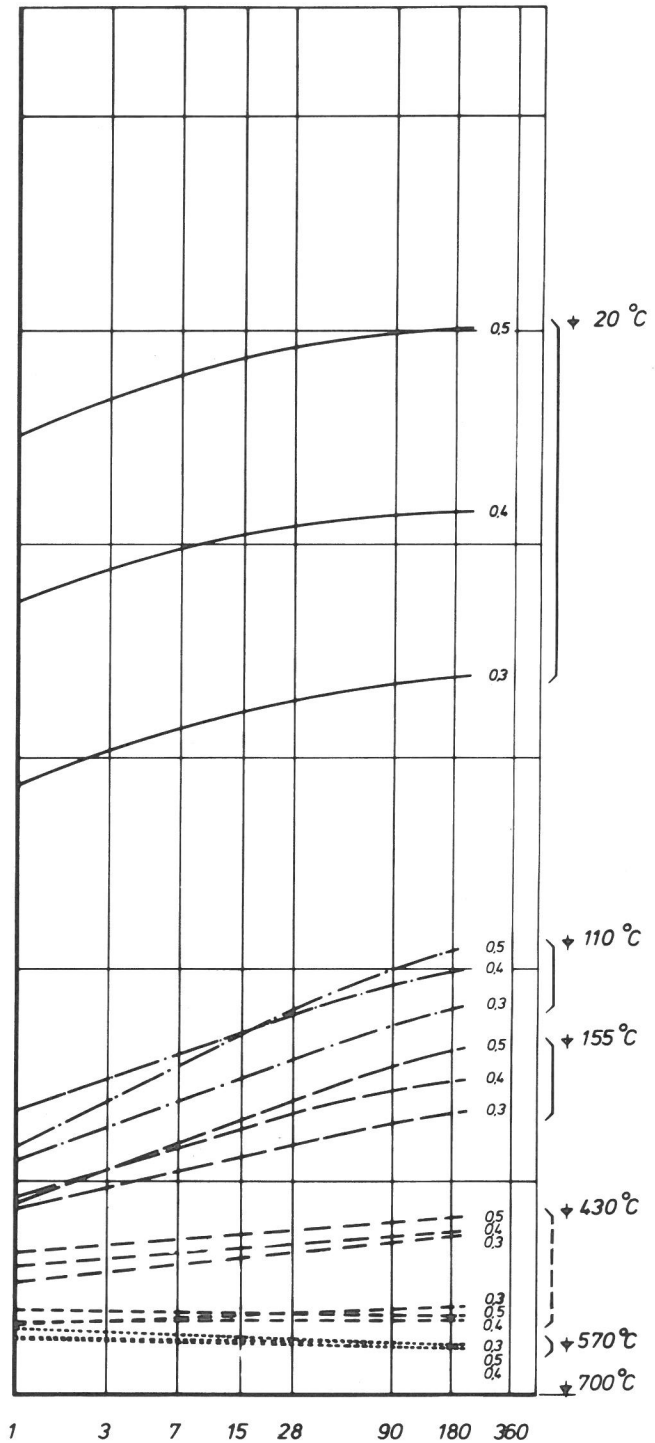
2.3.2. Verdampfbares und nicht verdampfbares Wasser

2.3.2.1. Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Die nachfolgend erläuterten Untersuchungen waren dazu bestimmt, die Einflüsse der Beheizung, d.h. der örtlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen im Balken auf die Entwicklung der Gefügeeigenschaften des Betons zu erfassen, soweit sie sich in den Verhältnissen der Gehalte an verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser widerspiegeln. In Anbetracht der aus versuchstechnischen Gründen geringen Probenmengen an Matrixmörtel war insbesondere bei den Feuchtigkeitsgehaltsbestimmungen mit größeren Streuungen zu rechnen, da das Verhältnis von Gesamtporenvolumen zu Feststoffvolumen sowie der für die Wasseraufnahme wichtige Po-



Wärmebehandlung



thermogravimetrische Untersuchung
(Aufheizgeschwindigkeit vgl. Bild 39)

Bild 40
Wassergehalt von Zementstein (W/Z von 0,20 bis 0,55) in Abhängigkeit vom Alter; ermittelt durch Wärmebehandlung bei 105, 550 und 1000 °C bzw. durch thermogravimetrische Untersuchung

renraum bei allen Probekörpern nicht gleich sein würde. Ebenso war zu erwarten, daß bei den Bestimmungen der Gehalte an nicht verdampfbarem Wasser durch Wärmebehandlung bei 550 °C die Meßwerte durch Gewichtsverluste des Zuschlages beeinträchtigt würden. Insofern konnten anhand dieser Meßergebnisse zunächst nur die Entwicklungstendenzen aufgewiesen werden.

Die nach dem in Bild 7 dargestellten Versuchsplan aus den Balkenfenstern paarweise entnommenen Probekörper aus Matrixmörtel wurden unmittelbar nach der Entnahme gewogen und - um Feuchtigkeitsverluste zu vermeiden - sofort weiter verarbeitet:

Der eine Probekörper wurde halbiert. Eine Hälfte diente zur Bestimmung der Trockenrohichte, wobei sich zusätzlich jeweils ein Wert für den Gehalt an verdampfbarem Wasser ergab. Die andere Hälfte wurde zur Bestimmung der Reindichte herangezogen (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Von dem zweiten Probekörper diente das Material der einen Hälfte zur Messung der Porengrößenverteilung (vgl. Abschnitt 2.3.4), die andere wurde zur Untersuchung der Gehalte an

verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser benutzt. Zu diesem Zweck wurde das Material (je 20 bis 30 g) zunächst vorgetrocknet und gewogen, um Verdampfungsverluste bei der nachfolgenden Zerkleinerung im Mörser möglichst gering zu halten. Die Trocknung bei 105 °C dauerte jeweils 48 Stunden, eine Zeit, die bei Versuchen an zerkleinertem Material als ausreichend ermittelt worden war. Nach der Wägung wurde das Probematerial auf 550 °C erhitzt und 24 Stunden bei dieser Temperatur gehalten. Danach erfolgte das Glühen bei 1000 °C ebenfalls über einen Zeitraum von 24 Stunden.

Die infolge Wärmebehandlung bei 550 °C durch die Zuschläge verursachten Gewichtsverluste mußten mittels Trocknungsversuchen an den im Matrixmörtel enthaltenen Körnungen abgeschätzt werden. Für den calcitischen Mörtel ergab sich ein Anteil am Gehalt des nicht verdampfbaren Wassers von etwa 1,3 Vol.-%, für das Kiessandmaterial von etwa 1,2 Vol.-%.

2.3.2.2. Meßergebnisse

Bild 41 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen des Gehaltes an verdampfbarem Wasser an den Probekörpern aus Matrixmörtel für die Balken

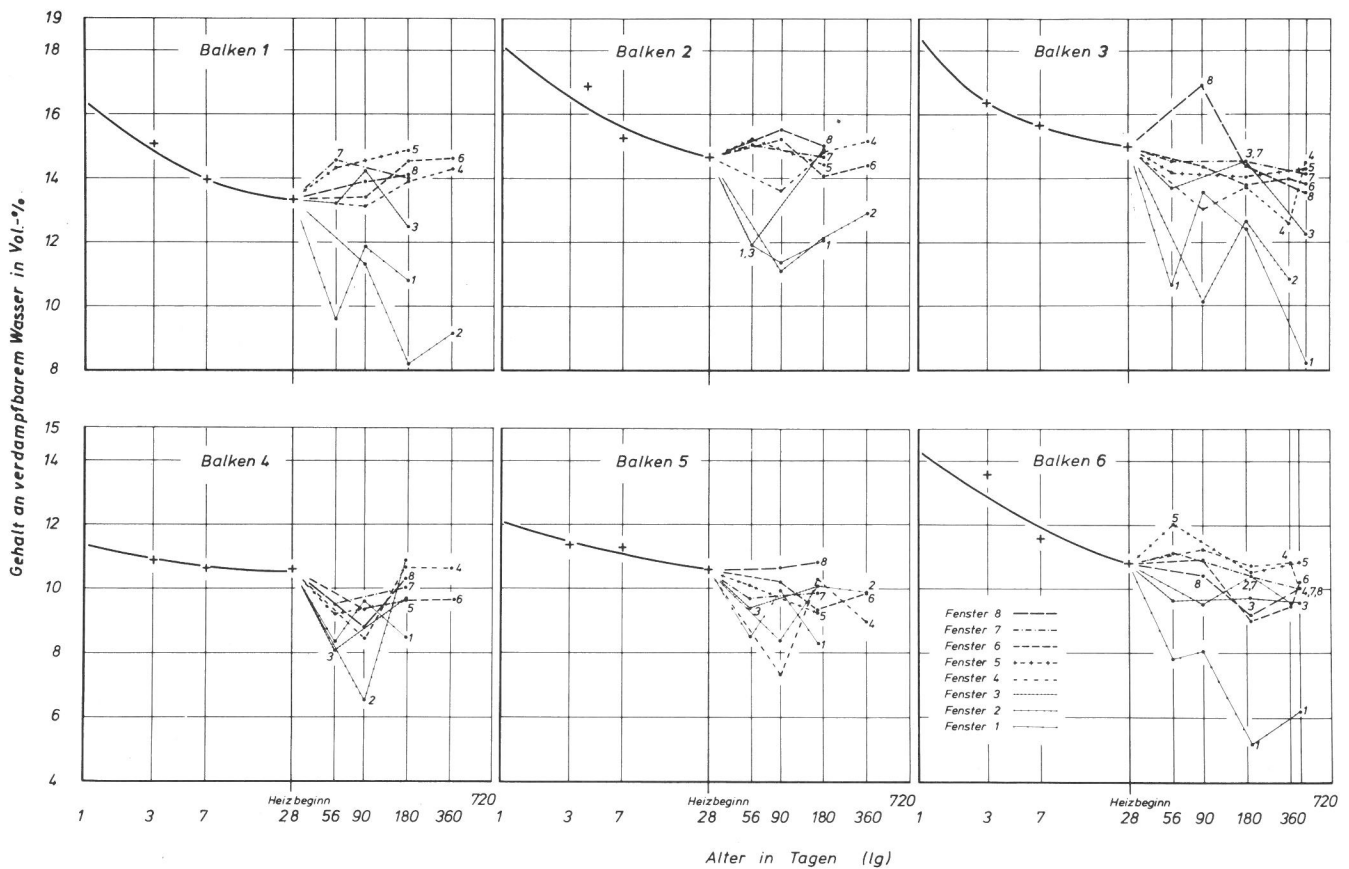


Bild 41
Abhängigkeit des Gehaltes an verdampfbarem Wasser vom Alter sowie von der Lage im Balken (Fenster 1 bis 8) nach Heizbeginn; ermittelt an den Probekörpern aus Matrixmörtel der Balken 1 bis 6

1 bis 6. Zur Aufstellung der Diagramme wurden auch die bei der Bestimmung der Rohdichte ermittelten Werte benutzt, da diese keine erkennbaren systematischen Unterschiede gegenüber den an zerkleinertem Mörtel ermittelten Werten zeigten. Für die Altersstufen 3, 7 und 28 Tage konnten jeweils 3 bzw. 4 Einzelmessungen ohne Berücksichtigung der Lage der Entnahmestelle (Fenster) im Balken zu Mittelwerten zusammengefaßt werden. Für die Altersstufen nach dem Heizbeginn wurde nach der Lage unterschieden, wobei maximal zwei Einzelmessungen gemittelt werden konnten. Diese Daten sind durch gebrochene bzw. punktierte Linien miteinander verbunden.

An den Ergebnissen der Untersuchungen des Matrixmörtels auf den Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser ließen sich innerhalb einer Betonart keine Abhängigkeiten vom W/Z-Wert erkennen. Die für die Balken ermittelten Werte streuten erwartungsgemäß stark und wurden nach der Korrektur um den Gewichtsverlust des Zuschlages für die beiden Betonarten zusammengefaßt und in Bild 42 dargestellt. Links ist die Entwicklung des Gehaltes an nicht verdampfbarem Wasser für die Matrixmörtel der calcitischen Betone (Balken 1 bis 3) und rechts der Kiessand-Betone (Balken 4 bis 6) aufgeführt. Die Daten für die drei Altersstufen bis zum Heizbeginn konnten ohne Berücksichtigung örtlicher Besonderheiten als Mittelwerte aus maximal sechs Einzelwerten zusammengefaßt werden. Die nach Heizbeginn in Ab-

hängigkeit vom Alter aufgetragenen Daten entsprechen dem Mittel aus höchstens vier Einzelwerten. Mit Hilfe der durchgezogenen Linien wird die Entwicklung des Gehaltes an nicht verdampfbarem Wasser für die Fenster 1 bis 3 nach Heizbeginn veranschaulicht, der gestrichelte Linienzug faßt die Ergebnisse der Messungen an den Fenstern 4 bis 8 zusammen.

2.3.3. Gesamtporosität

2.3.3.1. Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Die Gefügeentwicklung des Betons läßt sich mit Hilfe der Änderungen der Gesamtporosität kennzeichnen (vgl. auch (83)). Diese nimmt unter normalen Erhärtungsbedingungen während des Reifungsprozesses ab, da die Hydratationsprodukte einen Teil des ursprünglich vorhandenen Porenraumes einnehmen. Da die entstehenden Produkte wie auch ihre Beständigkeit von den vorherrschenden thermischen und hygrischen Bedingungen abhängig sind, war mit Unterschieden in der Entwicklung des Porenvolumens entsprechend der Lage des Betons im Balken zu rechnen.

Als Material für die Untersuchung der Gesamtporosität stand jeweils ein Probekörper des Matrixmörtels zur Verfügung, über dessen Entnahme in Abschnitt 2.3.2.1 berichtet wird. Ergänzend dazu wurden Messungen an Zementstein mit W/Z-Werten zwischen 0,25 und 0,55 (vgl. Ab-

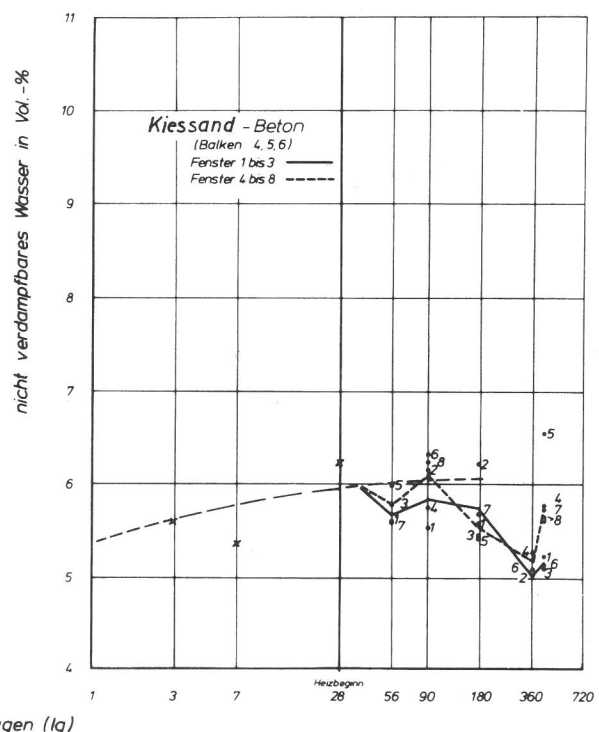
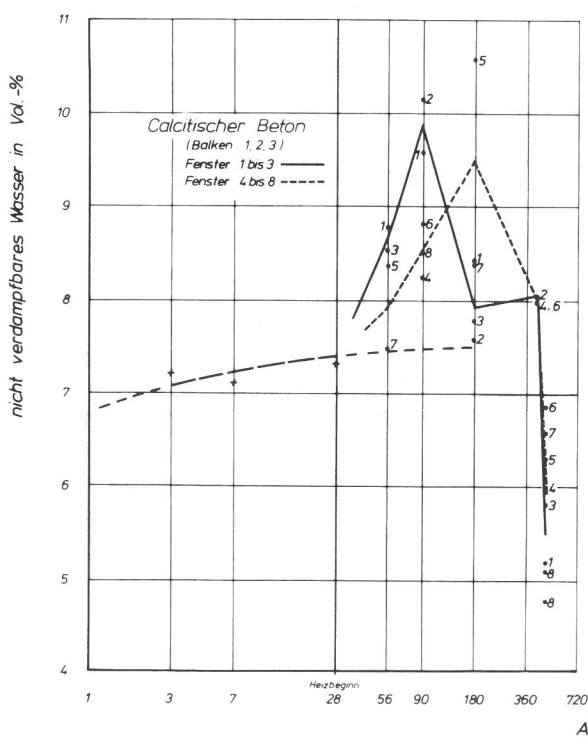


Bild 42

Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser der Probekörper aus Matrixmörtel mit calcitischem Zuschlag (Mittelwerte für Balken 1 bis 3 nach Abzug des Zuschlaganteiles);

Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser der Probekörper aus Matrixmörtel mit Kiessand-Zuschlag (Mittelwerte für Balken 4 bis 6 nach Abzug des Zuschlaganteiles);

aufgetragen in Abhängigkeit vom Alter sowie von der Lage im Balken (Fenster 1 bis 8) nach Heizbeginn

schnitt 2.1.1.4) vorgenommen. Die Zementsteinprismen lagerten bis zum jeweiligen Prüfaller in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung. Die Untersuchungen wurden entsprechend DIN 52 102 (5) durchgeführt. Zur Ermittlung der Rohdichte (ρ_{tr}) diente jeweils eine Probekörperhälfte, die andere Hälfte wurde nach dem Zerkleinern und Trocknen zur Messung der Dichte (ρ_0) mit dem Luftvergleichpyknometer nach Beckman herangezogen, bei dem die Volumenbestimmung mittels Druckabgleich zweier über einen Differenzdruckmesser gekoppelter Meßkammern vorgenommen wird (vgl. dazu (84)).

2.3.3.2. Meßergebnisse

Die Gesamtporosität (U_t) ergibt sich aus den für die Rohdichte und Dichte ermittelten Werten nach der Beziehung

$$U_t = \left(1 - \frac{\rho_{tr}}{\rho_0} \right) \cdot 100 \text{ in } \%$$

Um vor allem auch den Einfluß der Beheizung auf die Entwicklung des Porenraumes sichtbar zu machen, wurden die Meßergebnisse für die beiden sich im Zuschlag unterscheidenden Betonarten in Bild 43 zusammengefaßt. Für die Alters-

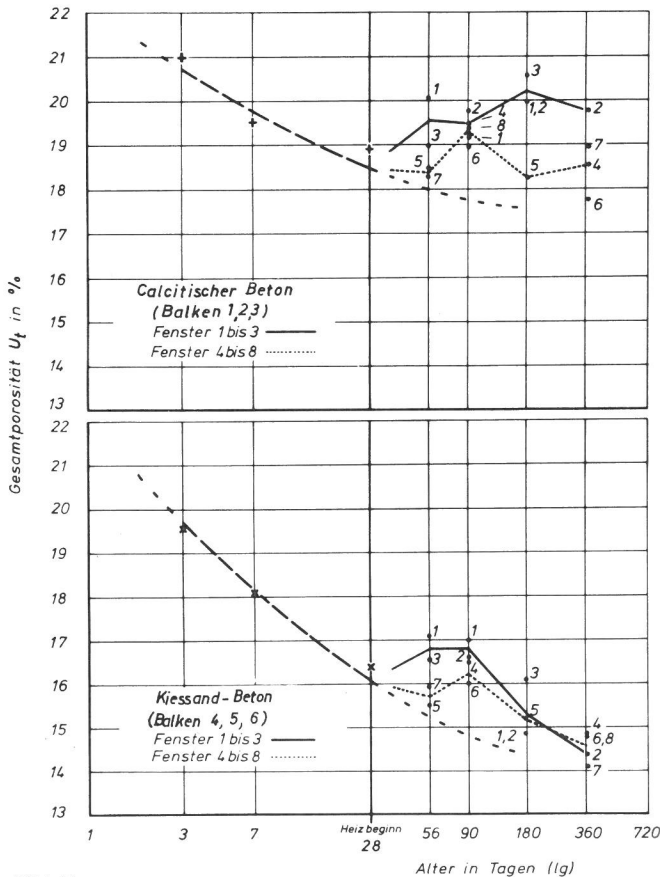


Bild 43 Entwicklung der Gesamtporosität (U_t) des Matrixmörtels mit calcitischem Zuschlag (Balken 1 bis 3) und mit Kiessand-Zuschlag (Balken 4 bis 6) in Abhängigkeit vom Alter sowie von der Lage im Balken (Fenster 1 bis 8) nach Heizbeginn

stufen 3, 7 und 28 Tage war eine Unterscheidung nach der Lage im Balken (Nr. des Fensters) nicht notwendig, so daß hier jeweils sechs Einzelmessungen gemittelt wurden (strichlierte Ausgleichskurve). Die Daten für die Altersstufen nach Heizbeginn, bei denen durch Angabe der Fenster-Nr. nach Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen unterschieden werden muß, repräsentieren jeweils drei Einzelwerte. Die durchgezogene Linie nach Heizbeginn faßt die Ergebnisse für die Fenster 1 bis 3 zusammen, die punktierte Linie die für die Fenster 4 bis 8.

In Bild 44 sind die Gesamtporositäten (U_t) der Zementsteinproben zusammengestellt. Das Diagramm gibt die Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Alter des Zementsteins wieder, und zwar für W/Z-Werte zwischen 0,25 und 0,55.

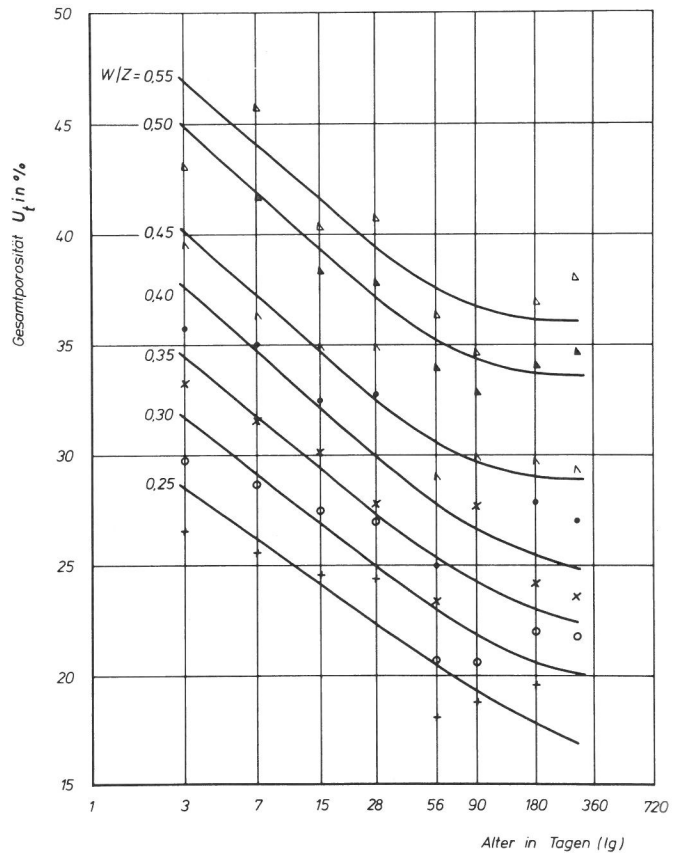


Bild 44 Gesamtporosität (U_t) von wassergelagertem Zementstein (W/Z = 0,25 bis 0,55) in Abhängigkeit vom Alter

2.3.4. Porengrößenverteilung

2.3.4.1. Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Neben den chemischen und mineralogischen Merkmalen des Zementsteines sowie der Matrixmörtel interessiert im Hinblick auf die technologischen Eigenschaften der Betone vor allem das

Porengefüge, das durch die Art und Verteilung der Poren gekennzeichnet ist. Für die Messungen der Porengrößenverteilung nach dem von Ritter und Drake (85) vorgeschlagenen Verfahren wurde ein Quecksilberporosimeter nach Guyer jr., Böhlen und Guyer (86) mit einem Druckbereich bis 2000 bar (für Porenradien zwischen ca. $7 \cdot 10^3$ und 4 nm) eingesetzt. In (82) wird u.a. eine schematische Darstellung des von der Firma Carlo Erba gebauten Gerätes wiedergegeben, das auch über eine Zusatzeinrichtung zur Messung größerer Poren mit Radien zwischen ca. $55 \cdot 10^3$ und $7 \cdot 10^3$ nm verfügt.

Die Grundlagen der Meßmethode sind in der Literatur (z.B. (24, 87, 18)) ausführlich dargestellt und sollen hier nur so weit wiedergegeben werden, als das für die Beurteilung der Ergebnisse notwendig ist. Die Methode basiert auf dem Kapillargesetz für den Gleichgewichtszustand

$$p \cdot r^2 \cdot \pi = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \sigma \cos \varphi$$

bzw.

$$p = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cdot \cos \varphi, \quad (\text{Gl. / 3 /})$$

wobei p der Druck, r der Radius der Kapillare, σ die Oberflächenspannung des Mediums und φ dessen Randwinkel ist (vgl. dazu Bild 45). Für Quecksilber auf nichtmetallischen Werkstoffen ergeben sich Randwinkel, die größer sind als 90° , und der rechte Teil der Gl. wird negativ, d.h. das Quecksilber benetzt nicht und muß in das Porensystem eingedrückt werden. Unter der Voraussetzung das σ und φ konstante Größen sind, nämlich $\sigma = 0,48 \text{ N/m}$ für reines Quecksilber und $\varphi = 141,3^\circ$ als Randwinkel (24), ergibt sich die Beziehung zwischen dem Radius der kleinsten gefüllten Pore und dem Druck (bar)

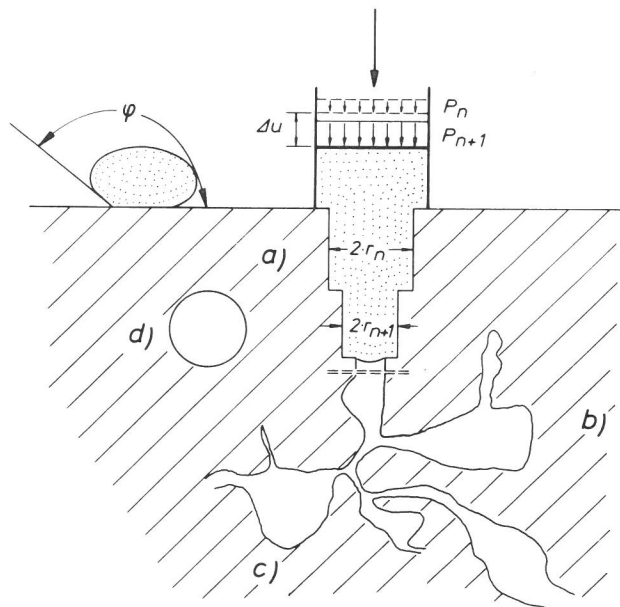
$$r = \frac{7492}{p} \quad \text{in nm.} \quad (\text{Gl. / 4 /}).$$

Winslow und Diamond (20) haben experimentell an bei 105°C getrocknetem Zementstein den Randwinkel von Quecksilber zu 117° ermittelt und mit der Oberflächenspannung von $\sigma = 0,484 \text{ N/m}$ eine veränderte Bestimmungsgleichung erhalten. Diese würde z.B. für die hier zur Verfügung stehende Meßeinrichtung einen Porenradienbereich von ca. 2,2 bis $33 \cdot 10^3$ nm umfassen. In Anbetracht der Zielsetzung, relative Änderungen der Porengrößenverteilung in einem Mehrstoffsystem zu untersuchen, wurden jedoch die üblicherweise zugrundegelegten mittleren Werte für die Oberflächenspannung und den Randwinkel beibehalten (88).

Die Messungen werden so durchgeführt, daß zunächst mit Hilfe des Luftdruckes stufenweise Quecksilber in das ursprünglich evakuierte Probematerial eingedrückt wird, wobei jeweils die

Änderung von Volumen und Druck zu messen sind. Danach wird der Druck mit Hilfe eines mehrstufigen hydraulischen Systems in einer automatisch gesteuerten Apparatur stufenweise erhöht, und Druck und Volumen werden von einem Schreiber registriert. Die Berechnung der Porenradien, die dem um die Kompressibilität des hydraulischen Systems korrigierten Porenvolumen zuzuordnen sind, erfolgt schrittweise mit Hilfe von Gl. / 4 /.

Gl. / 4 / gilt grundsätzlich nur für Kapillaren zylindrischer Form. Demnach sollten bei stufenweiser Drucksteigerung die aufeinander folgenden Poren immer kleiner werden (Bild 45, Fall a) und nicht - z.B. in der Art eines Fla-



Es bedeuten:

φ - Randwinkel von Quecksilber auf nichtmetallischem Werkstoff

a) - Folge von Zylinderporen mit kleiner werdendem Radius r

r_n, r_{n+1} - Radien aufeinanderfolgender Poren

P_n, P_{n+1} - Druck nach Füllen der Poren

u - Volumenänderung beim Füllen der Pore mit dem Radius r_{n+1}

b) - Pore mit Flaschenhalszugang

c) - große Pore mit Flaschenhalsöffnungen

d) - geschlossene Kugelpore

Bild 45

Schemaskizze zum Quecksilberporosimeterverfahren

schenhalses - den Zugang zu größeren Hohlräumen einengen (Bild 45, Fall b). Da die Porensysteme in Wahrheit wesentlich komplexer sind, haben die gemessenen Porengrößenverteilungen nur Modellcharakter. Bezeichnend dafür ist, daß das eingepreßte Quecksilber nicht wieder vollständig austritt, wenn bei stufenweiser Drucker-

niedrigung der Atmosphärendruck wieder erreicht wird, wofür in der Literatur verschiedene Gründe angegeben sind. Während Ritter und Drake (85) dies den Flaschenhalssporen zuschreiben meint Hill (89), daß sich in sehr großen Poren mit Flaschenhalssporen (vgl. Bild 45, Fall c) beim Entleeren freie Quecksilberspiegel ohne Verbindung nach außen bilden würden. Jüntgen und Schwuger (87) nehmen aufgrund von mikroskopischen Beobachtungen an einer Koksprobe an, daß darüber hinaus infolge des hohen Druckes Quecksilber in Form dünner Filme an den Wandflächen großer Poren beim Entleeren zunächst haften bleibt. Auserkorn und Horn (90) fanden, daß aus Zementstein etwa 50 % des eingepreßten Quecksilbers nicht wieder austraten, Sellevold (91) gibt für seine Untersuchungen an Zementstein 20 bis 45 % an. In (87) wird u. a. auch die Frage behandelt, ob die Porenstruktur nicht von vornherein durch die beim Einpressen entstehenden Belastungsunterschiede verändert wird. Wiederholungsmessungen ließen einen geringen Einfluß offenbar nur im Bereich großer Porenradien erkennen.

Insgesamt weist die Methode eine Vielzahl von Besonderheiten auf, die von nachhaltigem Einfluß auf die gemessenen Verteilungen sein dürften und z. B. Jung (92) zu der Feststellung veranlassen, daß die Maxima im Endbereich der Quecksilberporosimeterverfahren oft überschätzt würden. Ungeachtet dieser Meßbesonderheiten lassen die mit der Methode erfaßbaren relativen Änderungen des Porenraums Folgerungen hinsichtlich der Entwicklungsvorgänge zu.

In diesem Zusammenhang kommt schließlich noch der Frage der Probenvorbehandlung Bedeutung zu. Sellevold (91) berichtet, daß sich für Messungen an pulverisiertem Zementstein gegenüber denen an Stückchen des gleichen Materials beachtliche Unterschiede ergeben haben. Ferner dürfte die Wärmebehandlung bei 105 °C zum Austreiben des verdampfbaren Wassers aus den Proben von vornherein zur Veränderung des Porenraumes führen. Statt der Trocknung bei 105 °C wurden bei den nachfolgend geschilderten Versuchen die zerkleinerten Proben der Matrixmörtel im Vakuum bei ca. 10^{-3} Torr 3 Tage lang entwässert, da sowohl Entwässerungsversuche bei verschiedenen Temperaturen (vgl. (82)) als auch Vergleichsmessungen zu dem Resultat geführt hatten, daß mit dieser Trocknungsmethode der im wesentlichen von der Quecksilberporosimetrie erfaßte Porenraum offenbar ausreichend entleert wird.

Als Versuchsmaterial für die Durchführung der Messungen dienten Matrixmörtel (vgl. Abschnitt 2.1.1.3), Zementstein (Abschnitt 2.1.1.4) und Zuschlagproben. Von einem der beiden aus den Fenstern der Balken zur jeweiligen Altersstufe (vgl. Entnahmeplan Bild 7) entnommenen Mörtelproben wurde - wie in Abschnitt 2.3.2 berichtet -

nach dem Wägen eine Hälfte abgespalten, in Stückchen von rd. 2 bis 3 mm Durchmesser zerstoßen und im Vakuum bei etwa 10^{-3} Torr und Raumtemperatur 3 Tage lang getrocknet. Von dem so vorbereiteten und nach Augenschein als frei von größerem Zuschlag ausgesuchten Material wurden ca. 3 bis 4 g in das Dilatometergefäß (vgl. Bild 1 in (82)) eingefüllt und nach nochmaligem etwa 2-stündigem Evakuieren mit dem Quecksilberporosimeterverfahren vermessen. Von den Balken 1, 2, 4 und 5 sind bisher an je 26 Versuchsmaterialien Porengrößenverteilungen aufgenommen worden, von den Balken 3 und 6 waren es jeweils insgesamt 34 Versuchsmaterialien. Desgleichen gelangte Zementstein nach Abschnitt 2.1.1.4 sowie Proben des calcitischen und des Kiessand-Zuschlages zur Untersuchung auf Porengrößenverteilung.

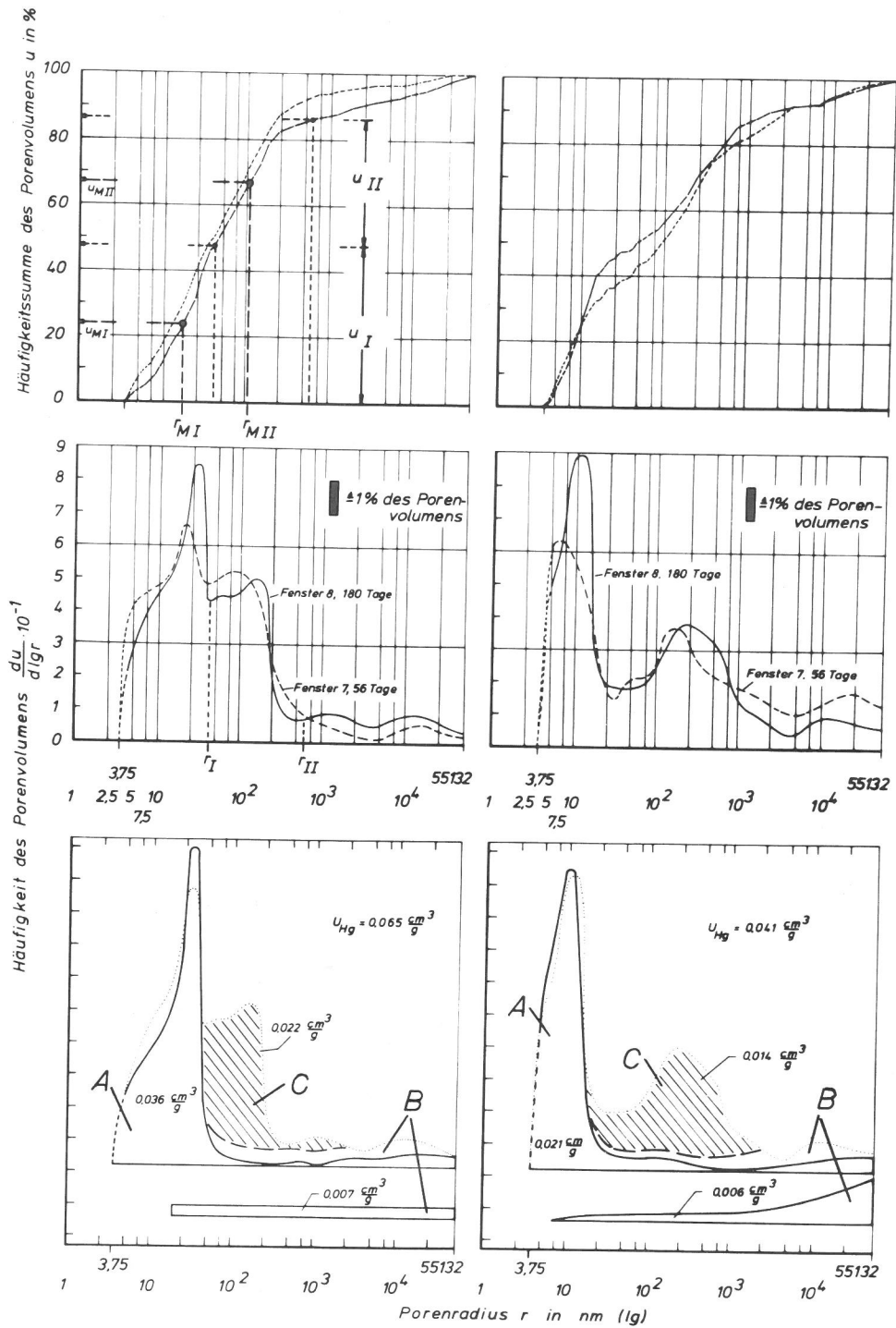
Der Druckbereich bis zu 1 bar (entspr. Porenradien bis ca. $7 \cdot 10^3$ nm) wurde in 8 Stufen vermessen, die Auswertung der Schreiberdiagramme für Drücke bis 2000 bar (entspr. Porenradien bis ca. 4 nm) erfolgte in 36 Stufen nach einem vorgefertigten Schema.

2.3.4.2. Meßergebnisse

Mittels Gl. / 4 / ergeben sich unter Berücksichtigung des im Blindversuch gemessenen Korrekturgliedes für die Eigenkompressibilität des hydraulischen Systems aus den Druck- und Volummessungen die Häufigkeitssummen des Porenvolumens (u) in Abhängigkeit vom Porenradius (r). Diese Kurven wurden für alle Versuchsmaterialien über ($\lg r$) aufgetragen (vgl. z. B. die Summenlinien im oberen Teil des Bildes 46 für die Versuchsmaterialien aus den Fenstern 7 und 8 der Balken 2 und 5). Die gemessenen Porenvolumina (U_{Hg}) sind in Bild 47 in Abhängigkeit vom Alter und von der Lage innerhalb der Balken (Nr. des Fensters) dargestellt. Dabei wurden die bis zum Heizbeginn gemessenen Einzelwerte - unabhängig von der Entnahmestelle - zusammengefaßt.

Aus den Häufigkeitssummen (Bild 46 oben) läßt sich für den Porenradius r_i der Anteil des Porenvolumens in Prozent des Gesamtvolumens aller Poren mit $r < r_i$ unmittelbar ablesen. Obgleich diese Summenkurven (auch Verteilungssummen genannt) Aufschluß über die Zuordnung des Porenvolumens zu den Porenradien geben, war es zur besseren Veranschaulichung notwendig, die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen (auch Verteilungsdichten genannt) unter Zuhilfenahme einer Rechenanlage zu ermitteln und ebenfalls über ($\lg r$) darzustellen.

Die in Bild 46 Mitte sowie in den Bildern A 17 bis 20 im Anhang als Beispiele wiedergegebenen Verteilungen sind Ausgleichskurven zu den vom Rechner gezeichneten Histogrammen der Häufigkeit des Porenvolumens $du/d(\lg r)$, aufgetragen



Calcitischer Beton Balken 2

Kiessand-Beton Balken 5

Bild 46

Darstellungsmethoden und Erläuterungen zu der mit dem Quecksilberporosimeter gemessenen Abhängigkeit zwischen Porenvolumen (u) und Porenradius (r) für je zwei Proben des Matrixmörtels der Balken 2 und 5

- oben - Häufigkeitssummen des Porenvolumens in Abhängigkeit vom Porenradius (\lg)
- Mitte - Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens in Abhängigkeit vom Porenradius (\lg)
- unten - schematische Aufteilung des erfaßten Porenvolumens (U_{Hg}) in: Zementsteinporosität (A), Zuschlagporosität (B), gefügebundene Porosität (C)

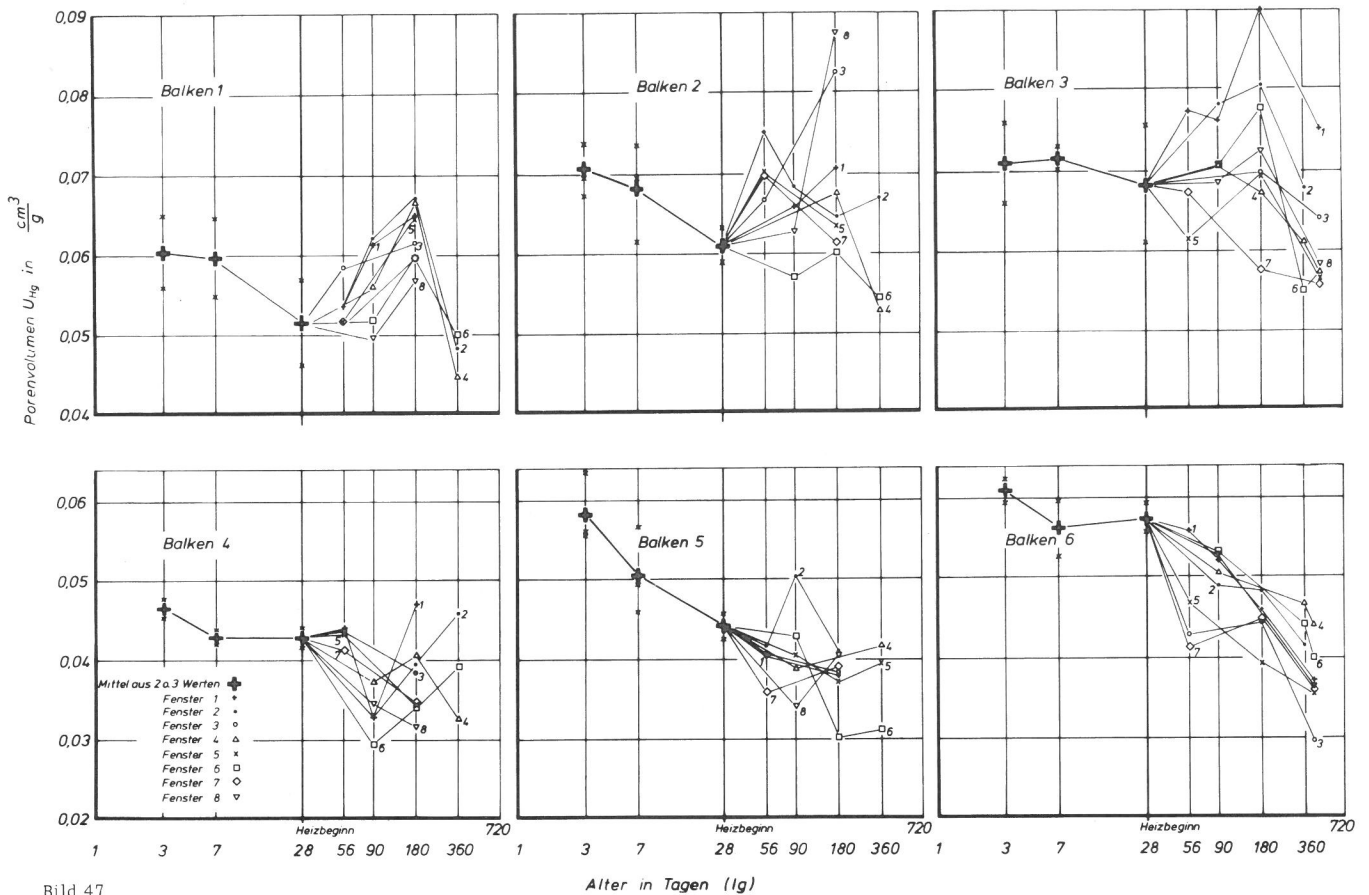


Bild 47

Porenvolumina (U_{Hg}) in Abhängigkeit vom Alter sowie von der Lage im Balken (Fenster 1 bis 8) nach Heizbeginn, gemessen mit dem Quecksilberporosimeter am Matrixmörtel der Balken 1 bis 3 (Beton mit calcitischem Zuschlag) und 4 bis 6 (Beton mit Kiessand-Zuschlag)

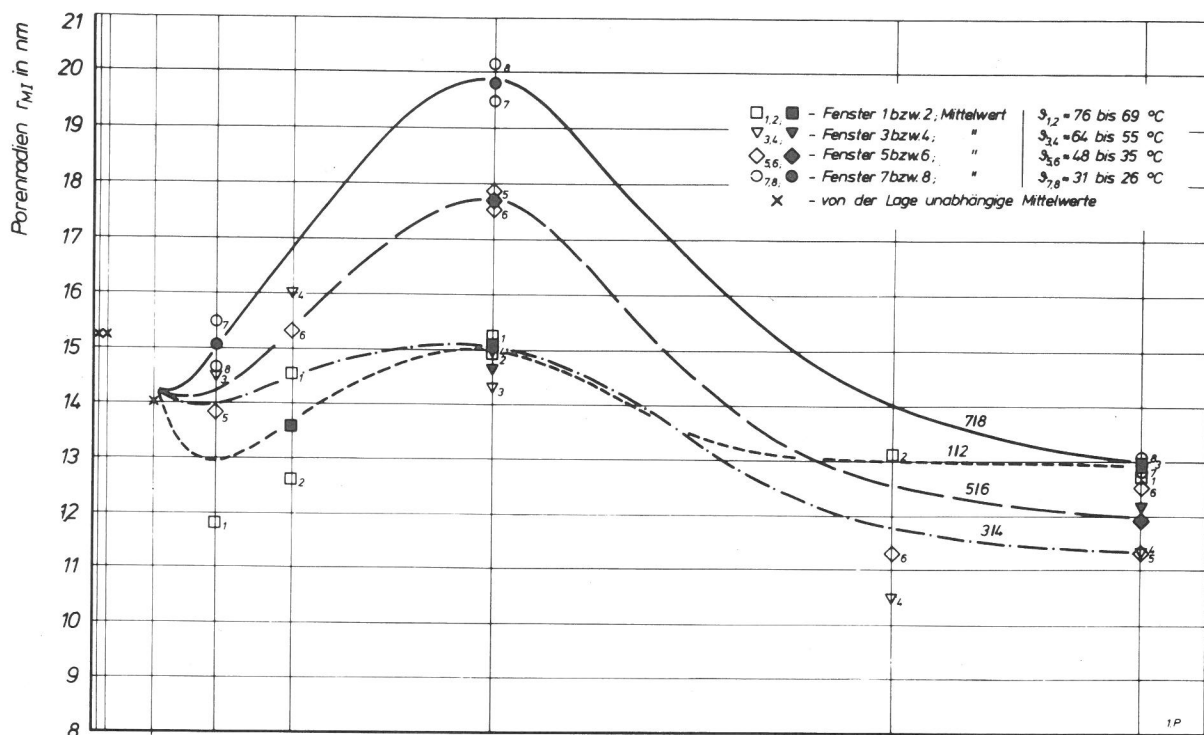
über (lg r). Bild A 17 zeigt Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens für die Altersstufen von 3, 7 und 28 Tagen, ermittelt an Proben des Matrixmörtels der calcitischen (Balken 1 bis 3) und der Kiessand-Betone (Balken 4 bis 6). In Bild A 18 sind Häufigkeitsverteilungen von Proben des Matrixmörtels aus den Fenstern 2, 7 und 8 der Balken 3 und 6 für verschiedene Altersstufen einander gegenübergestellt. Die Bilder A 19 und A 20 geben die Häufigkeitsverteilungen der gewichtsbezogenen Porenvolumina wieder, die an Zementstein verschiedenen W/Z-Wertes und Alters sowie an Proben des Kalkstein- und des Kiessand-Zuschlages ermittelt wurden. Mit Hilfe des in den Bildern eingetragenen Flächenmaßstabes ist der zwischen zwei Porenradien gemessene Anteil des Porenvolumens am Gesamtvolumen zu entnehmen. Anhand dieser durch partielle Differentiation der Summenkurven gewonnenen Verteilungskurven werden Änderungen des Porenvolumens über den zugeordneten Porenradien gut sichtbar. So zeigt Bild 46 Mitte, daß sich typische Verteilungskurven der Matrixmörtel des calcitischen und des Kiessand-Betons hinsichtlich der Gestalt erheblich voneinander unterscheiden, was offensichtlich in ursächlichem Zusammenhang mit den Besonderheiten der Zuschläge steht. So sind in Bild 46 unten am Beispiel je einer Probe (aus Fenster 8, Alter 180

Tage) die den Bestandteilen des Matrixmörtels zuzuordnenden Anteile am erfaßten Porenvolumen (U_{Hg}) sowie die gefügebedingte Porosität abgeschätzt. Die erhaltenen Werte fußen auf den in den Bildern A 19 und 20 des Anhangs dargestellten Verteilungskurven für Zementstein, Kalkstein und Kiessand-Zuschläge.

An den Verteilungskurven der Bilder A 17 und 18 des Anhangs läßt sich ferner erkennen, daß offenbar bestimmten Porenradien zuzuordnende Volumenanteile (in den Darstellungen Flächenanteile) mit dem Alter zu anderen Porenradien hin verschoben werden. Ein weiteres Ziel bestand daher darin, die qualitativ in den Verteilungskurven sichtbaren Änderungen zahlenmäßig zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden die Histogramme an charakteristischen, immer wiederkehrenden Minima in Flächenabschnitte geteilt, die durch die kleinsten bzw. größten erfaßten Porenradien und innerhalb der Verteilungskurven durch die Radien r_I und r_{II} begrenzt sind (Bild 46 Mitte). Der begrenzende Radius war für die beiden Zuschlagarten charakteristisch, und zwar ergab sich für das calcitische Material im Mittel $r_I \approx 40$ nm und für das Kiessand-Material im Mittel $r_I \approx 52$ nm, während r_{II} für beide Zuschlagarten einheitlich mit 740 nm festgelegt wurde. Durch Übertragung der begrenzenden Ra-

dien r_I und r_{II} in die Häufigkeitssummen (Bild 46 oben) ergaben sich die entsprechenden Volumenanteile u_I und u_{II} als prozentuale Anteile am gemessenen Gesamtporenvolumen. Deren mittelsten Werten u_{MI} und u_{MII} entsprechen die "zentralen" Porenradien r_{MI} und r_{MII} , wie in Bild 46 oben eingezeichnet. Die Verteilungsflächen u_I und u_{II} wurden durch Multiplikation mit den Porenvo-

lumina (U_{Hg}) des Bildes 47 in cm^3/g umgerechnet, für jeweils eine Betonart (3 Balken) zusammengefaßt und gemeinsam mit den zentralen Porenradien in Abhängigkeit vom Alter unter Berücksichtigung der Lage im Balken bzw. der entsprechenden Temperaturbereiche in Diagrammen aufgetragen. Die Bilder 48 und 49 zeigen die Entwicklung der zentralen Porenradien r_{MI} und



Balken 1 - 3

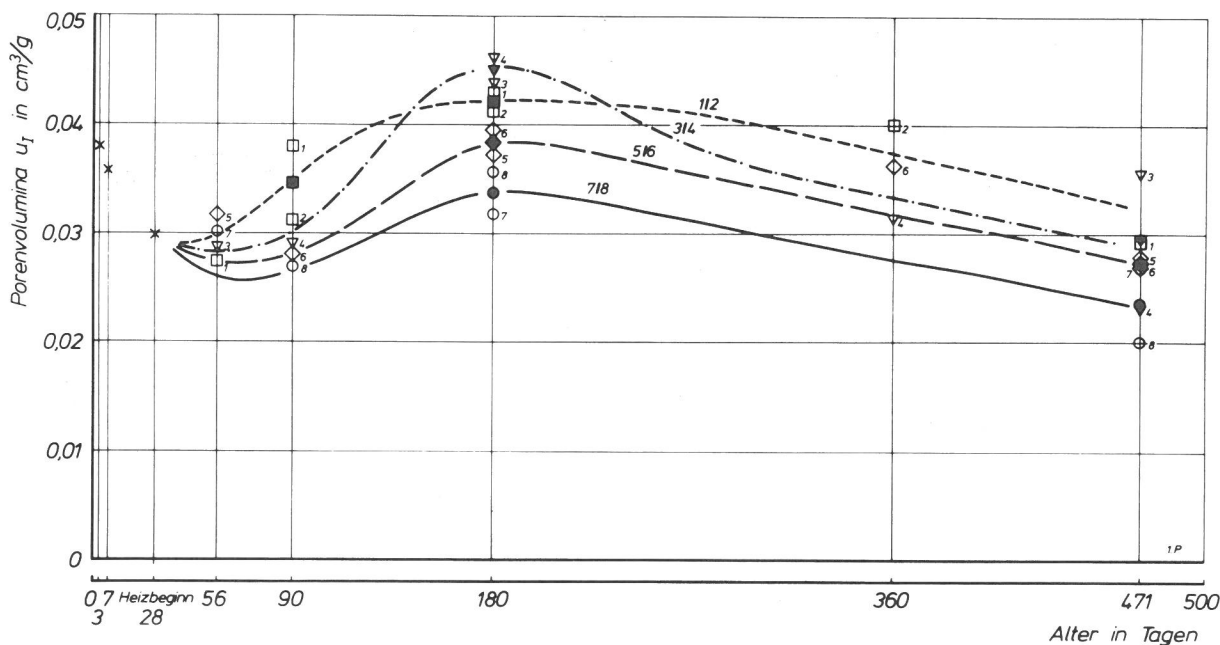
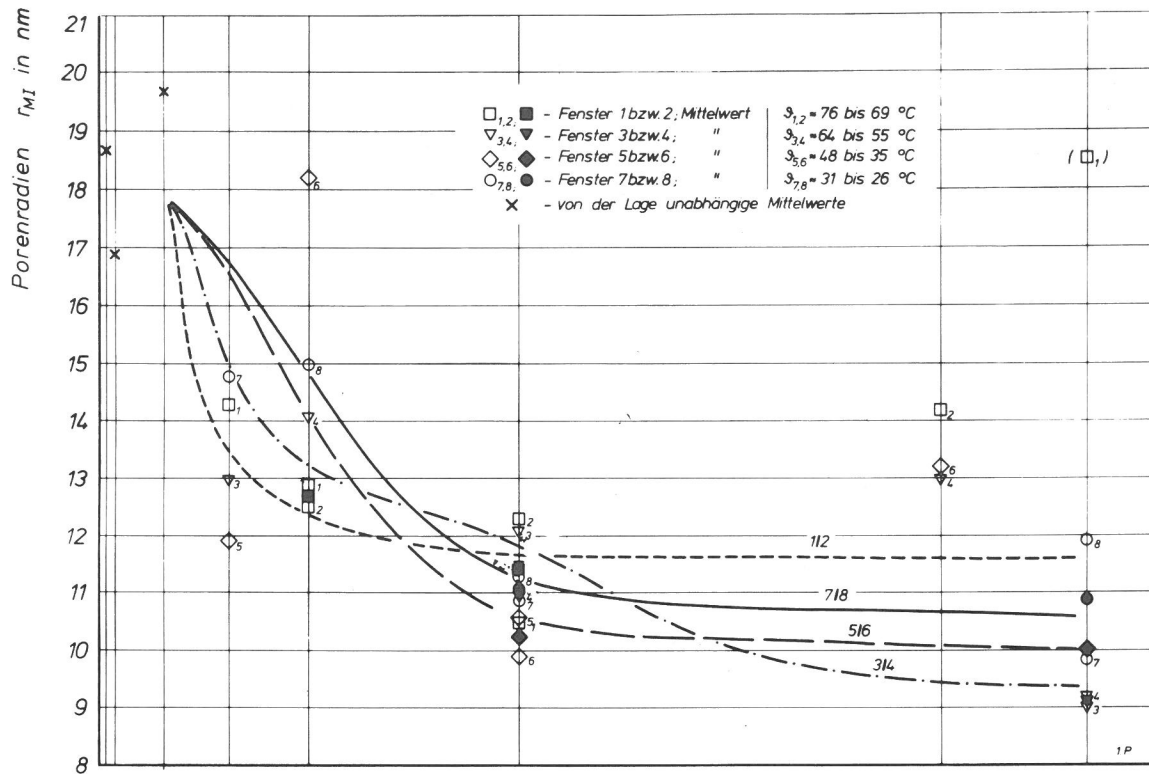


Bild 48
oben - Entwicklung der zentralen Porenradien (r_{MI}) in Abhängigkeit vom Alter
unten - Entwicklung der Porenvolumina (u_I) in Abhängigkeit vom Alter

gemessen am Matrixmörtel aus calcitischem Beton der Balken 1 bis 3; Ausgleichskurven für jeweils zwei Meßwerte (Fenster 1/2, 3/4, 5/6 und 7/8)



Balken 4 - 6

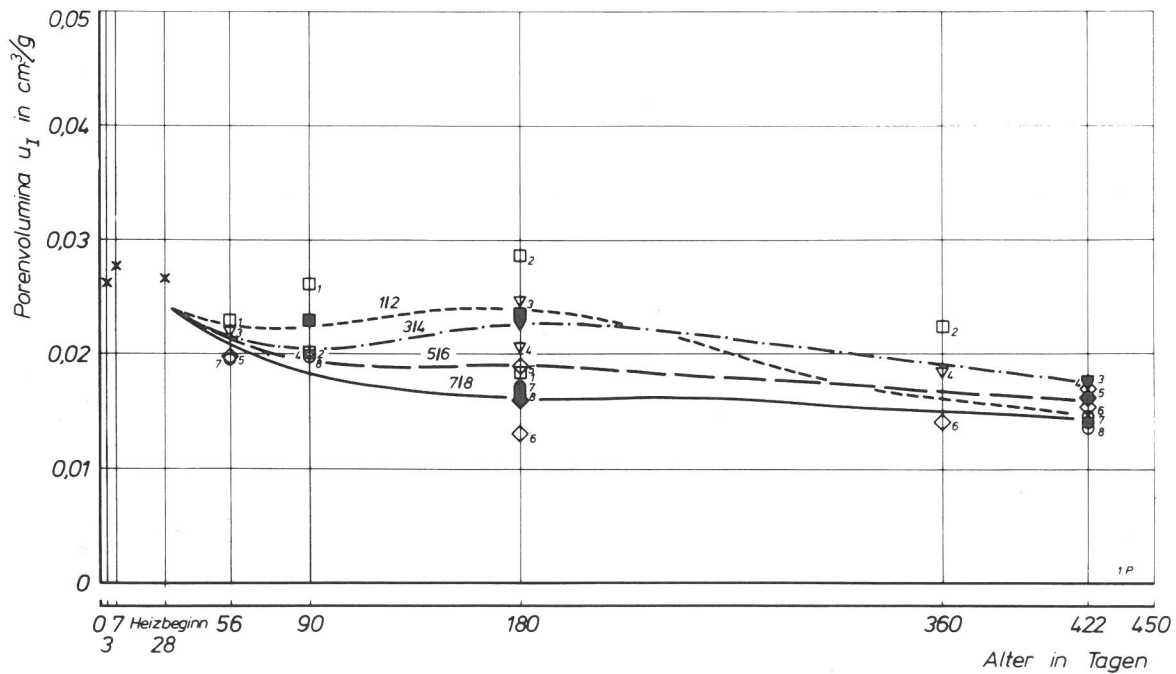


Bild 49

oben - Entwicklung der zentralen Porenradien (r_{MI}) in Abhängigkeit vom Alter

unten - Entwicklung der Porenvolumina (u_I) in Abhängigkeit vom Alter

gemessen am Matrixmörtel aus Kiessand-Beton der Balken 4 bis 6; Ausgleichskurven für jeweils zwei Meßwerte (Fenster 1/2, 3/4, 5/6 und 7/8)

der Porenvolumina u_I jeweils für die Balken 1 bis 3 bzw. 4 bis 6. In diesem Diagrammen wurden die lageunabhängigen Werte bis zum Heizbeginn gemittelt, während für die Altersstufen nach

Heizbeginn die Werte für je zwei benachbarte Fenster (vgl. die in den Bildern angegebenen Temperaturbereiche) zusammengefaßt wurden.

In Bild 50 links ist für die Balken 1 bis 3 (calci-tischer Beton) und rechts für die Balken 4 bis 6 (Kiessand-Beton) entsprechend den Bildern 48 und 49 die Entwicklung der zentralen Porenradien r_{MII} und der zugehörigen Porenvolumina u_{II} dargestellt.

In Bild 51 links sind, getrennt für die Matrix-

mörtel der Balken 1 bis 3 bzw. 4 bis 6, die Po-renvolumina u_I für die Altersstufen bis zum Heizbeginn am 28. Tag aufgetragen. Der für die jeweils drei Betone erkennbare Entwicklungsbe-reich wurde durch Begrenzungskurven und gegen-läufige Schraffierung der Felder hervorgehoben. Bild 51 rechts zeigt die entsprechende Darstel-lung für die Porenvolumina u_{II} .

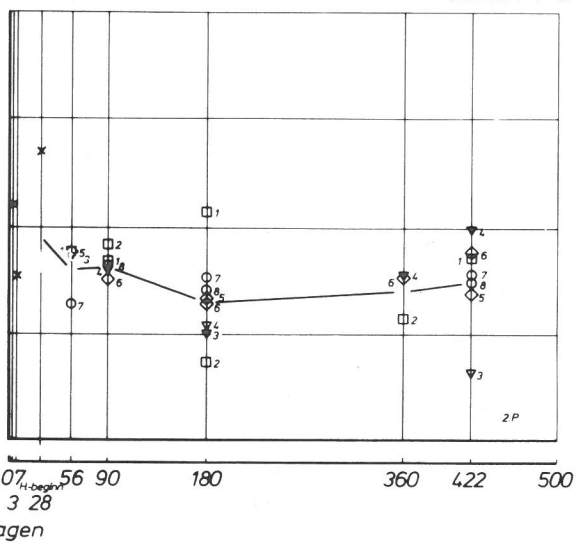
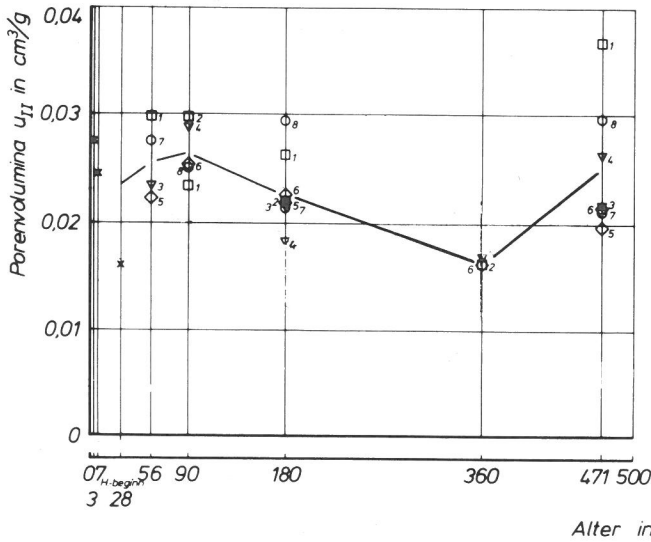
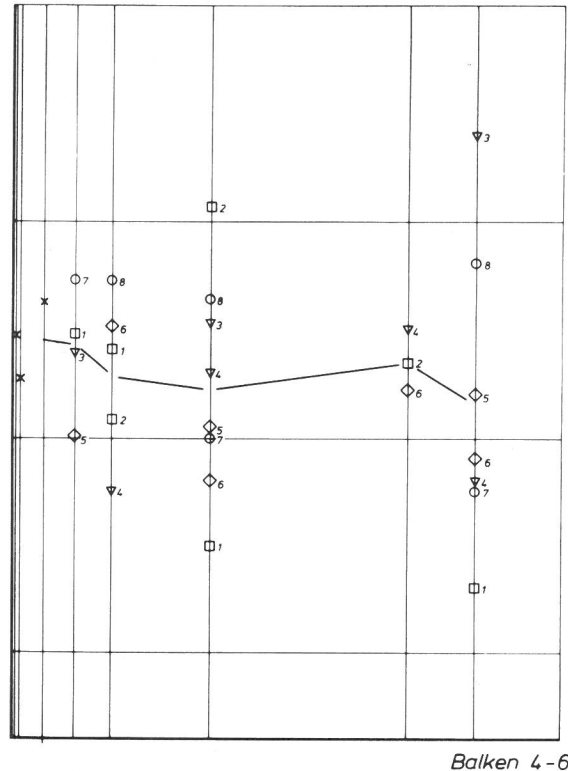
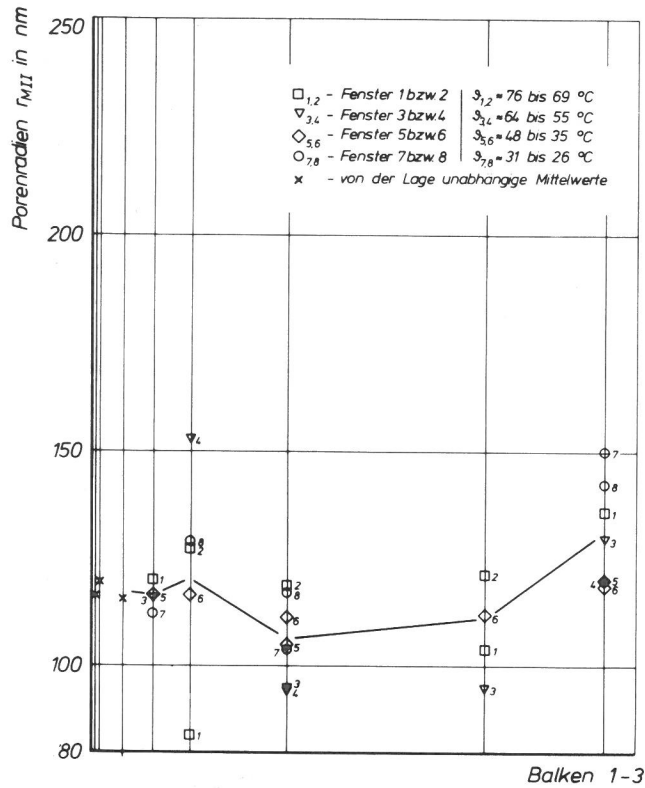


Bild 50
oben - zentrale Porenradien (r_{MII}) in Abhängigkeit vom Alter
unten - Porenvolumina (u_{II}) in Abhängigkeit vom Alter
gemessen am Matrixmörtel aus calcitischem Beton der Balken 1 bis 3 (Diagramme links) und aus Kiessand-Beton der Balken 4 bis 6 (Diagramme rechts)

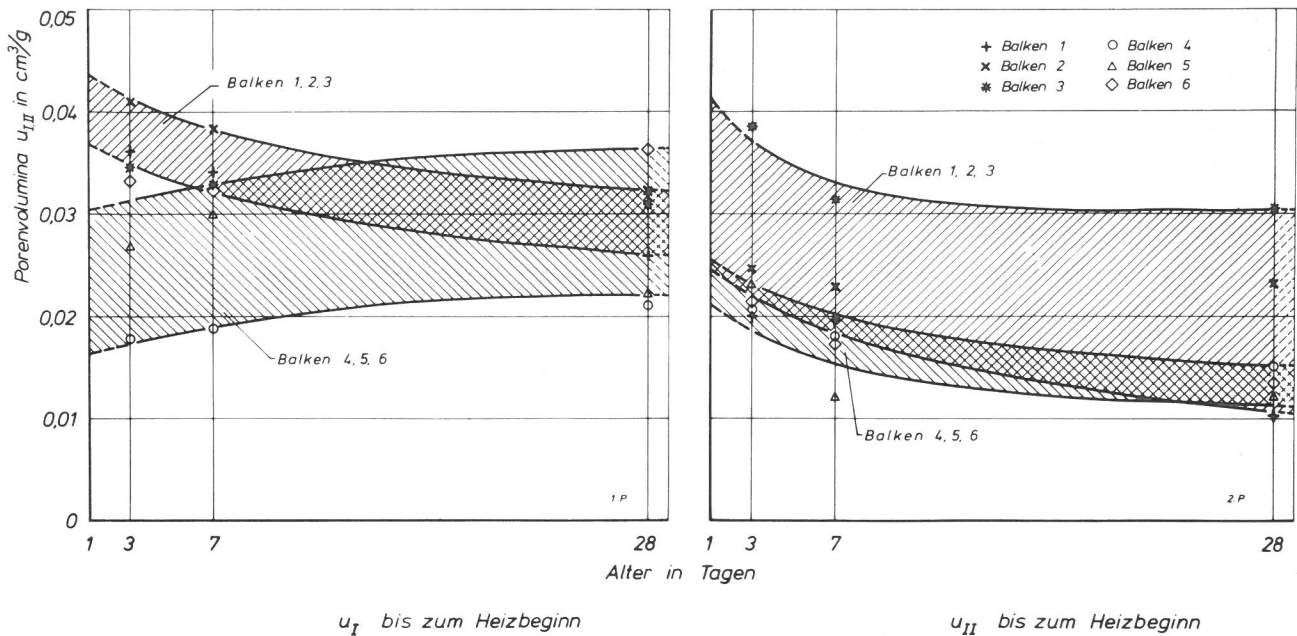


Bild 51
 Entwicklungsbereiche der Porenvolumina (u_I) und (u_{II}) der Matrixmörtel aus calcitischem Beton der Balken 1 bis 3 und Kiessand-Beton der Balken 4 bis 6 für Altersstufen bis zum 28. Tag

2.4. Untersuchungen zur Entwicklung der mechanischen Eigenschaften des Betons

2.4.1. Schrumpfen, Schwinden und thermische Ausdehnung

2.4.1.1. Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Außer den Messungen der Gesamtlängenänderungen an den Balken waren Untersuchungen des Dehnverhaltens notwendig, um die verschiedenartigen Einflüsse nach Art und Größe zu erfassen:

Die auf die Hydratationsvorgänge zurückzuführende Volumenverringerung infolge Schrumpfens und anschließenden Schwindens unmittelbar nach dem Betonieren konnte an den Balken selbst nicht gemessen werden. Nach dem Heizbeginn traten mit fortschreitender Austrocknung der Balken lokale Dehnungen infolge Schwindens auf, Vorgänge, die zur Zeit noch andauern und anhand von Untersuchungen an gesondert hergestellten Probekörpern abgeschätzt werden müssen. Durch thermische Ausdehnung wurden vor und nach Heizbeginn Längenänderungen der Balken verursacht, die in der mit dem Invarstab gemessenen Summe aller lokalen Längenänderungen zwar enthalten sind, jedoch im einzel-

nen nicht angegeben werden können, so daß auch Messungen der thermischen Ausdehnung an gesondert hergestellten Probekörpern erforderlich waren.

Zur Untersuchung der Dehnungen der beiden Betonarten infolge Schrumpfens und Schwindens im Frühstadium der Erhärtung wurde eine bereits in der Bundesanstalt für Untersuchungen an Mörteln und Purpasten erprobte Versuchseinrichtung, über die in (93) berichtet wird, verwendet. Sie besteht aus einer dreigeteilten Form - wie sie für die Herstellung von Zementmörtelprismen 4 x 4 x 16 cm benutzt wird - an deren Stirnseiten für die beiden äußeren Prismen induktive Weggeber angeordnet sind. Um bei den Messungen die Längenänderungen möglichst nicht zu behindern, wurden der Boden und die beiden seitlichen Längsflächen der Prismenformen mit je zwei Polytetrafluoräthylen-Folien ("Teflon") ausgelegt, zwischen denen sich ein Gleitfilm aus Öl befand. Um die Abgabe von Feuchtigkeit aus dem Beton an die Umgebung zu verhindern, waren auf die Prismenform mit Dichtungsmasse eine Glasplatte gekittet und die Hohlräume mit befeuchtem Schaumstoff ausgefüllt. Die Messungen erfolgten an jeweils zwei Prismen des calcitischen Betons (entsprechend Balken 2) und des Kiessand-

Betons (entsprechend Balken 5) während einer Zeitspanne von 100 Stunden nach dem Betonieren.

Die lineare thermische Ausdehnung wurde zunächst in Vorversuchen an je einem Balken des calcitischen und des Kiessand-Betons mit Abmessungen von 15 cm x 15 cm x 55 cm untersucht, und zwar für den Temperaturbereich zwischen 20 und 80 °C ohne Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgehaltes des Betons beschränkt auf die Randzustände feucht und trocken. Anhand der dabei gemachten Erfahrungen wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmedehnzahlen sowie des Endschwindmaßes durchgeführt: Je Betonart und Wasser/Zement-Wert wurden zwei Probekörper in zylindrischen Blechgefäßen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 23 cm betoniert und dampfdicht verschlossen (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Die membranartigen Stirnflächen der Behälter trugen Meßzapfen, die fest im erhärteten Beton verankert waren. Etwa in der Längsachse der Körper angeordnet befand sich jeweils ein Thermoelement. Nach dem Betonieren lagerten die Probekörper bis zum 29. Tag im Wärmeschrank, wo sie Temperaturen ausgesetzt waren, die annähernd denen entsprachen, die sich in den Balken nach dem Betonieren infolge Hydratationswärme eingestellt hatten (vgl. Bild 9).

Am 3., 7., 17. und 29 Tag wurden die Probekörper auf 5 °C abgekühlt und bei dieser Temperatur gehalten, bis das Thermoelement im Probekörper Prüfraumtemperatur aufwies. Mit Hilfe der den Temperaturdifferenzen entsprechenden Längenänderungen ergaben sich die Werte für den linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α). Nachdem am 29. Tag an je einem der beiden zu einem Beton gehörenden Probekörper die Dampfsperre (Blechmantel) entfernt worden war, wurde die Temperatur im Wärmeschrank auf 70 °C erhöht, so daß jeweils einer von 2 Probekörpern austrocknen konnte. Bei den nachfolgenden Untersuchungen bis zu einer Altersstufe von 122 Tagen wurden die Längenänderungen der Probekörper zu Temperaturänderungen zwischen ca. 70 und 5 °C gemessen und zur Berechnung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten herangezogen.

Um auch Näherungswerte für das Endschwindmaß der Betone in den heißen, durch hohe Feuchtigkeitsverluste gekennzeichneten Bereichen der Balken zu erhalten, wurde an den noch dampfdicht verschlossen bei 70 °C lagernden zylindrischen Probekörpern die Dampfsperre am 140. Tag entfernt, der Beton bei 105 °C ausgetrocknet und die durch die Trocknung bedingten Verkürzungen gemessen. Diese Messungen erfolgten bis zu einem Alter des Betons von annähernd 250 Tagen.

Als Probekörper für die Ermittlung der linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α) der Zuschläge dienten je 3 prismatische Probekörper (ca. 50 mm x 10 mm x 10 mm), die stichprobenartig ohne Berücksichtigung von Vorzugsrichtungen aus Gesteinsstücken herausgeschnitten und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden. Für die Messungen stand ein Dilatometer (mechanisches Übertragungssystem mit Kieselglasstab und induktivem Weggeber) zur Verfügung, in dem die Probekörper mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von 20 auf 100 °C erhitzt wurden.

2.4.1.2. Meßergebnisse

An den Probekörpern mit calcitischem Zuschlag wurden lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten (α) zwischen $4,2 \cdot 10^{-6}$ und $5,3 \cdot 10^{-6}$ /°C gemessen, an den Probekörpern aus quarzitischem Material ergaben sich Ausdehnungskoeffizienten zwischen $11,1 \cdot 10^{-6}$ und $12,0 \cdot 10^{-6}$ /°C.

Die an den Prismen 4 x 4 x 16 cm gemessenen Dehnungen infolge Schrumpfung und Schwindens ($\epsilon_{[s*]}$) sind im Bild 34 für die Zeit bis 100 Stunden nach dem Betonieren eingezeichnet, und zwar für Beton mit calcitischem Zuschlag entsprechend Balken 2 und Beton mit Kiessand-Zuschlag entsprechend Balken 5. Wie in Abschnitt 2.2.4.2 berichtet, standen für die Anschlußwerte bis zum 28. Tag die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Dehnungsmeßgebern in den Balken zur Verfügung.

Bild 52 zeigt für die Betone entsprechend der Balken 1, 2 und 3 sowie 4, 5 und 6 die zu steigendem Betonalter an den zylindrischen Probekörpern ermittelten thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α), nach dem 29. Tag getrennt für den feuchten ("mit Dampfsperre") und trockenen ("ohne Dampfsperre") Beton aufgetragen. Die beiden unteren Diagramme des Bildes geben die für die beiden Betonarten errechneten Mittelwerte wieder.

Die an den zylindrischen Probekörpern gemessenen Dehnungen infolge Schwindens (ϵ) sind in Bild 53 dargestellt. Sie ergaben sich durch Verminderung der Gesamtdehnungen um den temperaturbedingten Anteil (gemäß 1. Absatz dieses Abschnittes), wobei auf die Umgebungstemperatur von 20 °C und die Längenmessung am 6. Tag bezogen wurde. Die bis zu diesem Alter aufgetretenen Verkürzungen infolge Schrumpfung und Schwindens werden demnach von der Darstellung nicht berücksichtigt. Das für die Betone zu erwartende Endschwindmaß entspricht annähernd der durch Trocknung bei 105 °C verursachten Verkürzung zwischen dem 140. und 150. Tag.

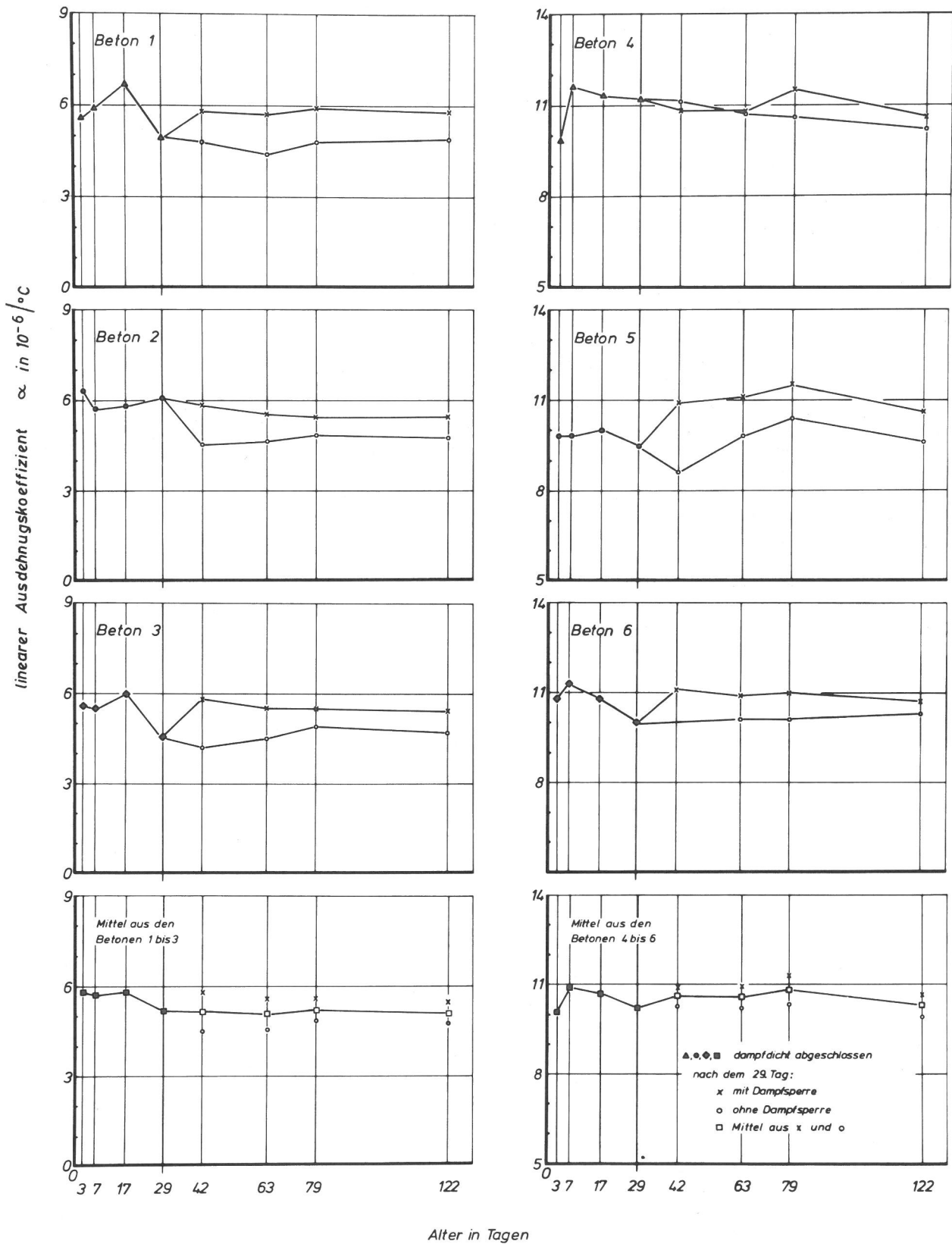


Bild 52
 Entwicklung des linearen Ausdehnungskoeffizienten (α) von Beton mit calcitischem (1 bis 3) und Kiessand-Zuschlag (4 bis 6) in Abhängigkeit vom Alter; ermittelt für Temperaturen zwischen ca. 5 und 70 °C an feuchten ("mit Dampfsperre") und trockenen ("nach dem 29. Tag ohne Dampfsperre") zylindrischen Probekörpern von 20 cm Länge

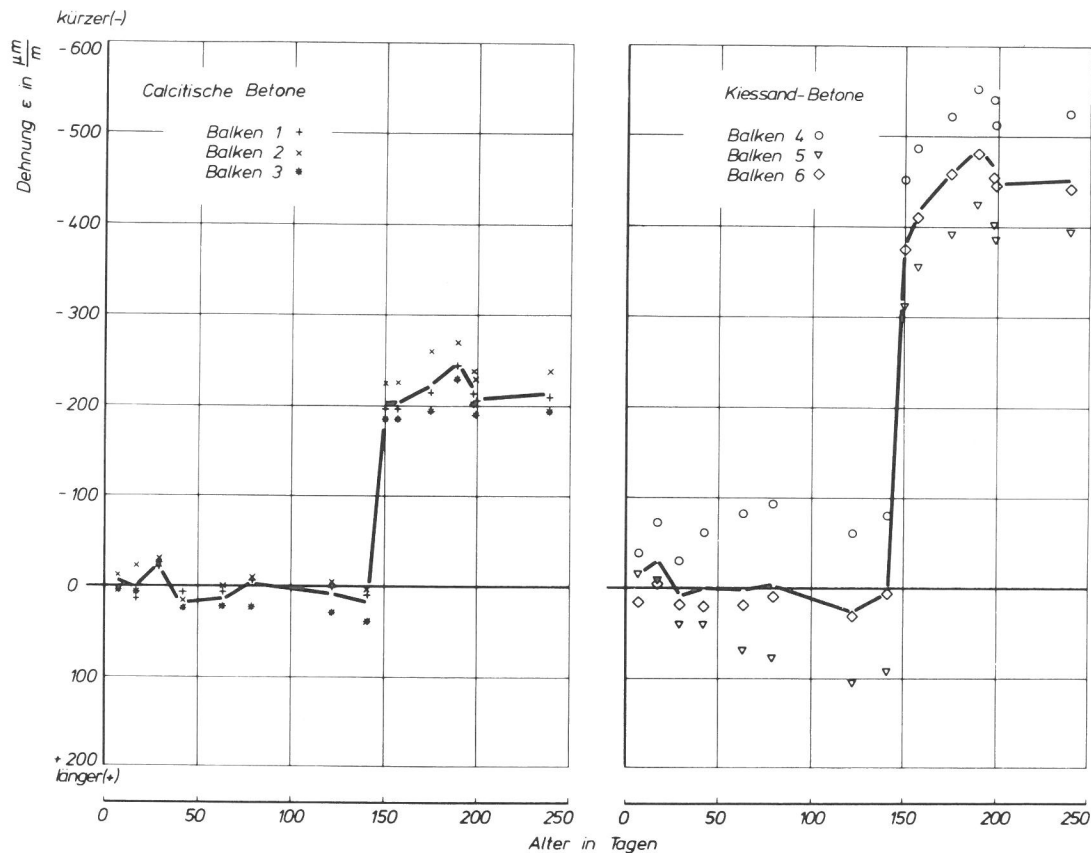


Bild 53
Dehnungen (ϵ) von Beton mit calcitischem Zuschlag (Balken 1 bis 3) und Kiessand-Zuschlag (Balken 4 bis 6) infolge Schwindens für das Alter nach dem 6. Tag; Lagerung der zylindrischen Probekörper in geschlossenen Gefäßen bei Temperaturen zwischen 20 und 70 °C bis zum 140. Tag und anschließende Trocknung bei 105 °C

2.4.2. Biegezug- und Druckfestigkeit von Zementstein, Zementmörtel und Beton

2.4.2.1. Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Bei den Prüfungen an Betonprobewürfeln zeigte sich, daß wegen der Streuung der Einzelwerte die durch die Vorgänge im Zementstein geprägte Entwicklung nur unzureichend interpretiert werden kann. Deshalb wurden in Übereinstimmung mit den Untersuchungen zur Gefügeentwicklung außerdem Festigkeitsprüfungen an Zementstein und Zementmörtel durchgeführt.

Die Prismen aus Zementstein (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) für die Prüfung auf Biegezugfestigkeit in Anlehnung an DIN 1164 (3) lagerten bis zum jeweiligen Prüftermin in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung.

Gemäß DIN 1164 dienten je drei Prismen aus Zementmörtel (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) zur Prüfung einer Zementprobe auf Biegezug- und Druck-

festigkeit. Die Prismen lagerten bis zu den Prüfterminen in Wasser.

Die für die Prüfungen auf Druckfestigkeit vorgesehenen Würfel aus Beton mit 10 bzw. 20 cm Kantenlänge unterschieden sich - wie in Abschnitt 2.1.2.2 berichtet - lediglich hinsichtlich ihrer Lagerungsbedingungen. Nach dem 7. Tag lagerte ein Teil weiter bei annähernd 20 °C und 100 % rel. Feuchte ("Feuchtlagerung"), der andere Teil bei 20 °C und 45 % rel. Feuchte ("Trockenlagerung"). Die Prüfungen auf Druckfestigkeit wurden zu den jeweiligen Prüfterminen an jeweils 3 Probewürfeln gemäß DIN 1048 (2) durchgeführt.

2.4.2.2. Meßergebnisse

In Bild 54 sind die Ergebnisse der Prüfungen auf Biegezugfestigkeit (β_B) und Druckfestigkeit (β_D) an Zementstein zusammengestellt.

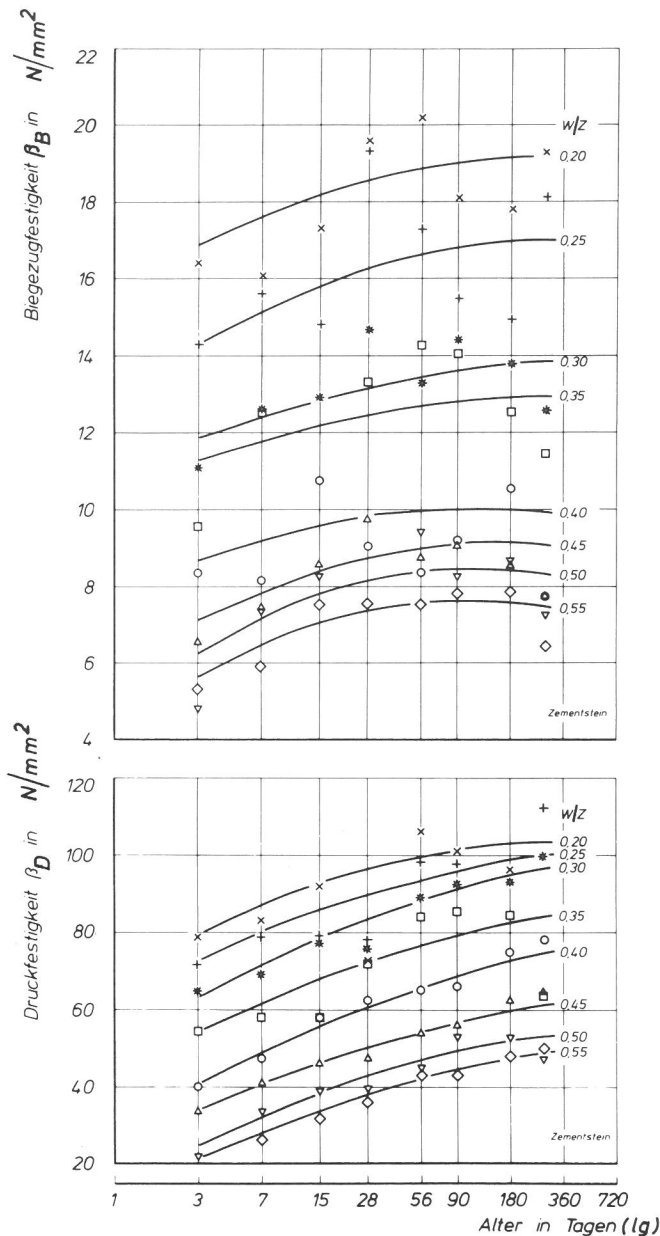


Bild 54
Entwicklung der Biegezugfestigkeit (β_B) und der Druckfestigkeit (β_D) von wassergelagerten Zementsteinprismen ($W/Z = 0,20$ bis $0,55$) in Abhängigkeit vom Alter

Bild 55 zeigt die an Zementmörteln dreier stichprobenartig entnommener Zementproben (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) gemessenen Biegezug- und Druckfestigkeiten. Jedes Symbol stellt das Mittel aus drei Einzelwerten dar, die jedoch keine merklichen Unterschiede für die drei Zementproben erkennen ließen, so daß Mittelwertkurven gezeichnet wurden.

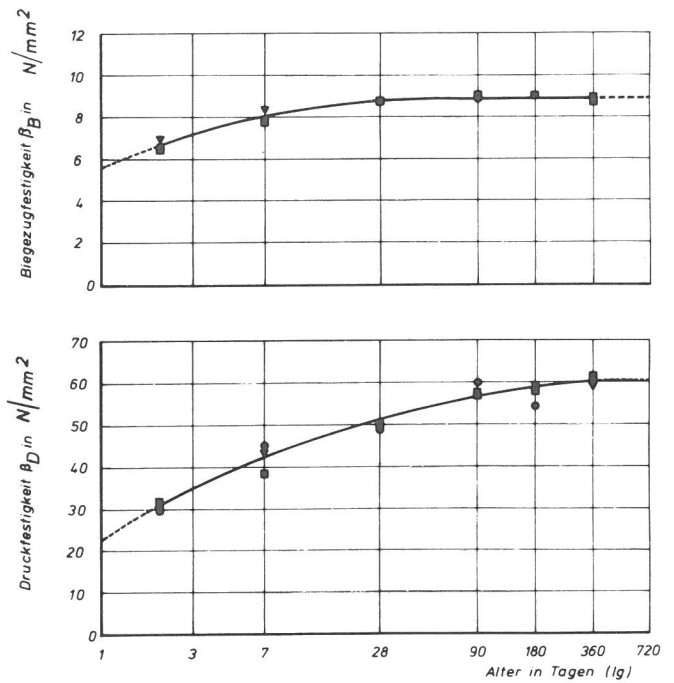


Bild 55
Entwicklung der Biegezugfestigkeit (β_B) und der Druckfestigkeit (β_D) von Zementmörtelprismen nach DIN 1164 in Abhängigkeit vom Alter (3 verschiedene Zementproben)

Die Einzelwerte der Prüfungen auf Druckfestigkeit (β_D) an den Probewürfeln aus Beton mit 10 cm Kantenlänge wurden mit Hilfe von Gestaltsbeiwerten den Ergebnissen für die Würfel mit 20 cm Kantenlänge angepaßt. Diese wurden - für jeden Beton einzeln - aus den Druckfestigkeiten von Würfeln mit 10 und 20 cm Kantenlänge für die Altersstufen 28 und 180 Tage abgeleitet. In den Diagrammen des Bildes 56 sind die Ergebnisse für die calcitischen Betone (Balken 1 bis 3) und die Kiessand-Betone (Balken 4 bis 6) zusammengestellt. Jedes Symbol repräsentiert 3 Einzelwerte. Die durchgezogene Gerade deutet die Entwicklung der Druckfestigkeit von Würfeln mit 20 cm Kantenlänge bei "Feuchtlagerung" an, während die gestrichelte Kurve die bei "Trockenlagerung" wiedergibt.

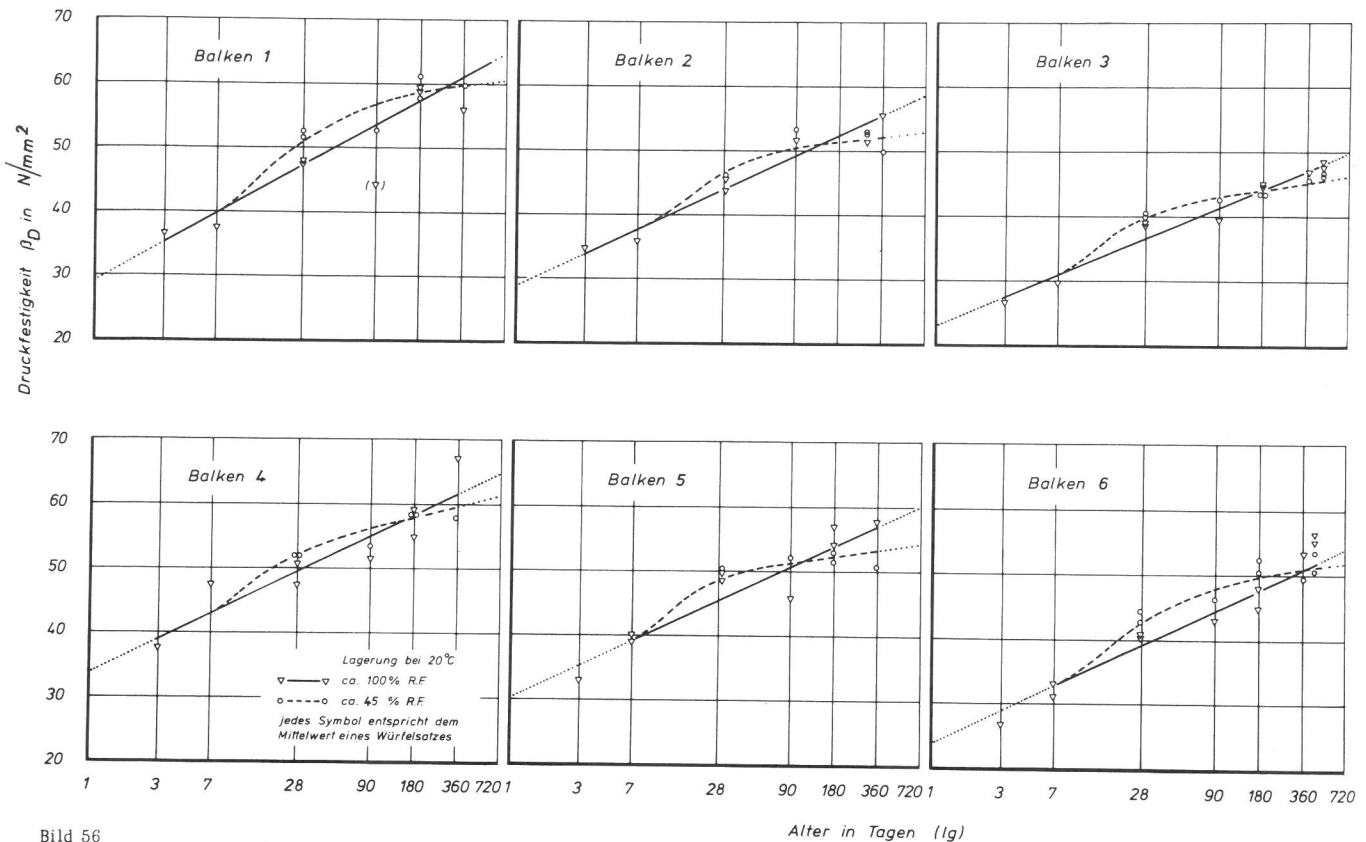


Bild 56

Entwicklung der Druckfestigkeit (β_D) in Abhängigkeit vom Alter bei "Feuchtlagerung" (20 °C/100 % R.F.) und "Trockenlagerung" (20 °C/45 % R.F.) für calcitische Betone der Balken 1 bis 3 und Kiessand-Betone der Balken 4 bis 6; ermittelt an Würfeln von 10 und 20 cm Kantenlänge

2.5. Korrelation thermisch-hygrisch beeinflusster Kennwerte

2.5.0. Umfang der Untersuchungen

Die Entwicklung der Eigenschaften der Betone in den Balken wird von den thermisch-hygrischen Vorgängen geprägt; umgekehrt ist die Wärme- und Feuchtigkeitsleitung von den Besonderheiten des Porenraumes und des Feststoffgerüsts abhängig. Dies soll am Beispiel des Einflusses von Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt auf die mechanischen Eigenschaften sowie auf die Wärmeleitfähigkeit deutlich gemacht werden.

2.5.1. Aufstellung der Wasserbilanzen

Die Balken bilden bis zum Heizbeginn hinsichtlich des Wassergehaltes ein abgeschlossenes System und können danach durch Trocknung an der freien Stirnseite Wasser nur verlieren, aber nicht hinzugewinnen. Dies erleichterte es, die lokalen, zeitabhängigen Entwicklungen der Wassergehalte in Form von Bilanzen zusammenzufassen und so die Meßergebnisse aus Abschnitt 2.2.3 einheitlich darzustellen.

In den Bildern A 1 bis 12 des Anhangs sind Beispiele für die zeitabhängige Entwicklung des Ge-

samtwassergehaltes sowie des Gehaltes an verdampfbarem Wasser - ermittelt an den für die wichtigsten Meßebenen bzw. den unmittelbar benachbarten Meßstellen - wiedergegeben. Diese Beziehungen sowie die Gesamtwassergehalte vor dem Heizbeginn, die mit den Daten der Tabelle 4 für die einzelnen Balken abgestimmt wurden, dienten zur Aufstellung von Wasserbilanzen (Bilder 57 und A 21 bis 38 des Anhangs) für jeweils 6 Altersstufen. Die an 23 Meßstellen über die Balkenlänge aufgetragenen Gesamtwassergehalte (gemessen mit der Neutronensonde) wurden zu diesem Zwecke durch Geraden zu einer Verteilungskurve verbunden, deren Verlauf in den Randbereichen an den Stirnseiten nur abzuschätzen war. (Die quantitative Erfassung der Wassergehalte in diesen Bereichen ist aber auch mit Hilfe der anderen verwendeten Bestimmungsverfahren nicht ohne Probleme). Da sich die Beträge an verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser in der Verteilungskurve addieren, läßt sich durch Subtraktion des verdampfbaren Anteils (gemessen mit den Feuchtigkeitsmeßelementen) auf den Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser schließen. Die in Bild 57 für Balken 3 / 470 Tage und Balken 6 / 421 Tage eingetragenen x - Symbole entsprechen den Daten der Meßstellen in halber Höhe der Balken, während die ∇ , Δ - Symbole die mit den darunter bzw. darüber angeordneten

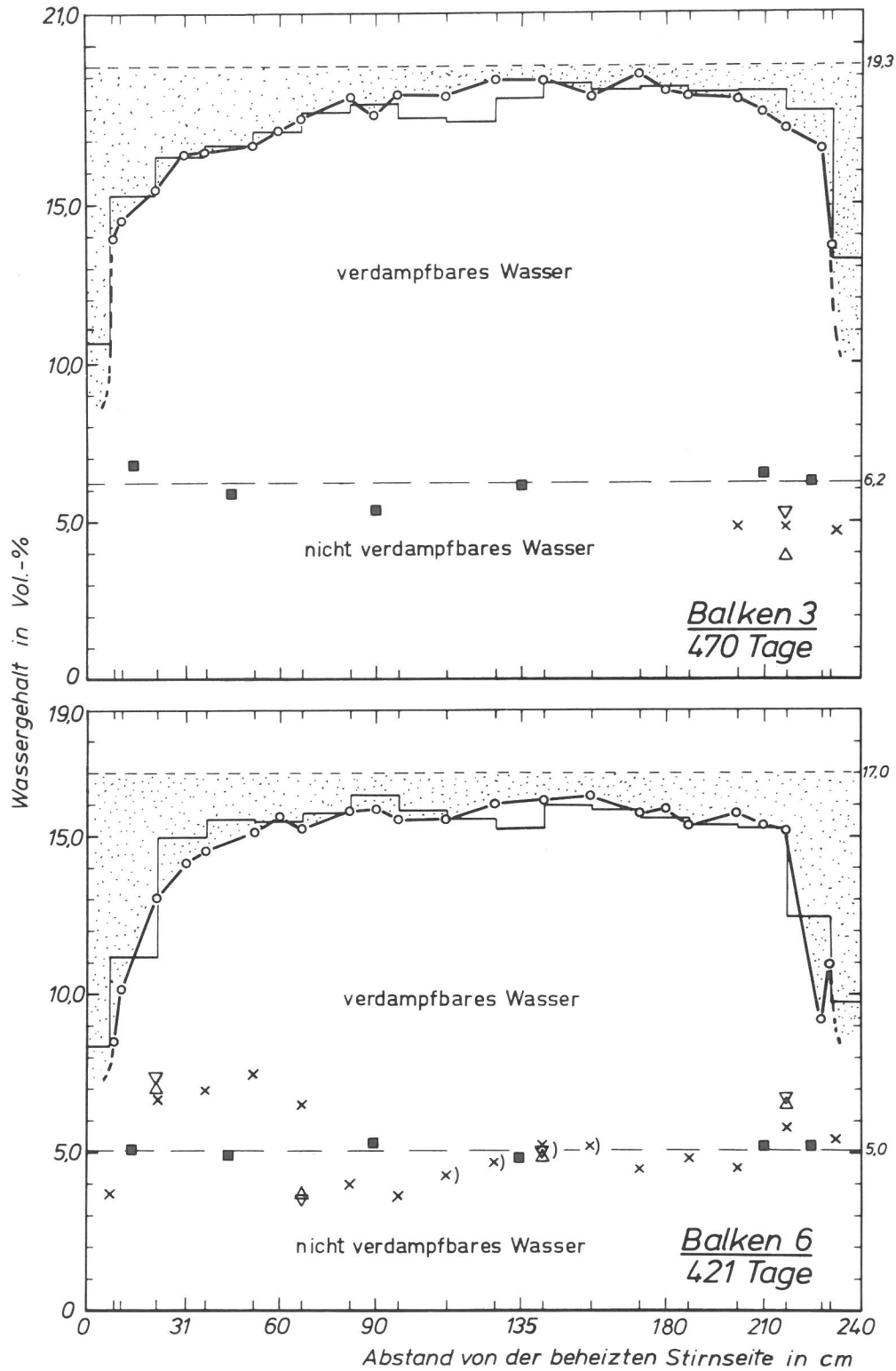


Bild 57
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge für Balken 3 (calciti-
 scher Beton) im Alter von 470 Tagen und Balken 6 (Kiessand-Beton) im
 Alter von 421 Tagen; die obere Begrenzung der punktierten Felder ent-
 spricht dem mittleren Ausgangswassergehalt; Randbereiche abgeschätzt
 (siehe auch die Bilder A 21 bis 38)

Elementen (vgl. auch Bild 5) gemessenen Ergebnisse repräsentieren. Im Unterschied zu den Darstellungen in den Bildern A 21 bis 38 im Anhang sind im Bild 57 zusätzlich die nach dem Spalten der Balken 3 und 6 gemessenen Wassergehalte aufgenommen, wobei der Gehalt an verdampfbarem Wasser für die untersuchten 17 Balkenabschnitte jeweils oberhalb des Mittelwertes für das nicht verdampfbare Wasser aufgetragen wurde (siehe stufenartige Verteilungskurve). Aus den eingetragenen Daten (■ - Symbole) des Gehaltes an nicht verdampfbarem Wasser ergab sich für den Balken 6 ein Mittelwert von 5,0 Vol.-% und den Balken 3 von 6,2 Vol.-% (unterbrochene Linie).

Oberhalb der Kurven des verdampfbaren Wassers ist jeweils der Mittelwert des Gesamtwassergehaltes der Balken vor Heizbeginn eingezeichnet. Die punktierte Fläche dient als Anhaltswert für den innerhalb des Versuchszeitraumes verlorenen Wassergehalt. In Analogie dazu sind Flächen oberhalb der gestrichelten Mittelwertlinie als Feuchtigkeitsgewinne anzusehen.

2.5.2. Längenänderungen

Die Ergebnisse der Messungen der Längenänderungen der Balken sowie der verschiedenen Einflüsse auf die Dehnung des Betons (Abschnitte 2.2.4 und 2.4.1) lassen sich anhand einer systematischen Darstellung folgendermaßen zusammenfassen:

Bild 58 zeigt die Entwicklung der Längenänderungen der Balken bezogen auf den Heizbeginn am 28. Tag (Nullwert). Die durchgezogene Kurve

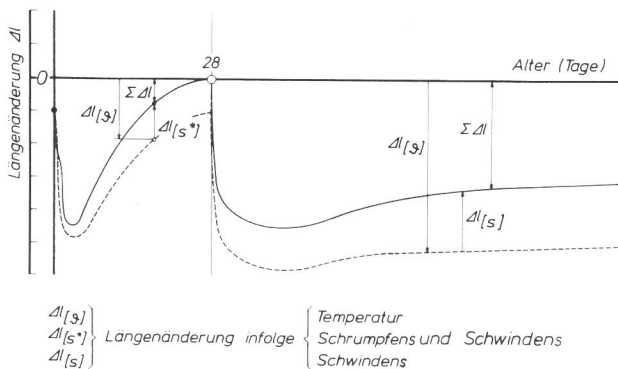


Bild 58
Schema der Entwicklung der Längenänderungen (Δl) der Betonbalken (Bezugswert: Heizbeginn am 28. Tag); die durchgezogene Kurve stellt die mit dem Invarstab aufgenommenen Gesamtlängenänderungen ($\Sigma \Delta l$) dar

($\Sigma \Delta l$) stellt die mit dem Invarstab gemessenen Werte dar; sie entspricht der Differenz der Längenänderungen infolge Temperatur ($\Delta l [s]$) und infolge Schrumpfung und Schwindens ($\Delta l [s^*]$) bzw. Schwindens ($\Delta l [s]$).

Die Volumenverringerung infolge Schrumpfung und Schwindens im Zeitabschnitt nach dem Betonieren ist mit den anfänglich besonders heftig ablaufenden Hydratationsvorgängen verknüpft, die - da es sich um exotherme Reaktionen handelt - für die Temperaturentwicklung und die daraus resultierenden Dehnungen verantwortlich sind. Aus der zeitlichen Verschiebung der Maxima der Temperaturentwicklung des Zementes (Bild 2) und der Betone (Bild 9) ist zu folgern, daß die Betontemperaturen und mit ihnen die Dehnungen den chemischen Vorgängen nacheilen. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß sich die Masse des Betons zunächst nur langsam erwärmt. Nach 24 Stunden haben die Betontemperaturen ihren höchsten Wert überschritten und die Längung der Balken wird wieder abgebaut. Sie kann mit Hilfe der thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α) in Bild 52 abgeschätzt werden; im Alter von 24 Stunden ergibt sich für den calcitischen Beton (mit $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) $\Delta l [s] \approx 450 \mu\text{m}$ und für den Kiessand-Beton (mit $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) $\Delta l [s] = 750 \mu\text{m}$. Am 28. Tag sind die Längenänderungen infolge Temperatur annähernd aufgehoben, geblieben ist eine Verkürzung infolge Schrumpfung und Schwindens ($\Delta l [s^*]$), die gemäß Bild 34 für beide Betonarten ca. $100 \mu\text{m}/\text{m} \cdot 2,4 \text{ m} = 240 \mu\text{m}$ beträgt und in der ein bleibender Anteil infolge Schrumpfung in der Frühphase der Erhärtung enthalten ist.

Nach Heizbeginn überlagern sich die Einflüsse der thermischen Ausdehnung sowie des Schwindens und Quellens, wobei auch Volumenänderungen auftreten, die auf Um- oder Neubildungen von Hydratationsprodukten zurückzuführen sind. Die mit den thermischen Veränderungen sowie der Trocknung an der freien Stirnseite verbundenen Längenänderungen infolge Schwindens und Quellens können ebenfalls anhand der mit dem Invarstab gemessenen und unter Zugrundelegung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten berechneten Werte abgeschätzt werden. So ergeben sich für die Zeit nach dem Erreichen einer annähernd linearen Temperaturverteilung im Balken, z. B. am 60. Tag, rechnerisch Längenänderungen infolge Temperatur, die nur wenig größer sind als die mit dem Invarstab gemessenen Werte der Bilder 31 und 32, und zwar auch bei Berücksichtigung der Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse auf die thermische Ausdehnung (vgl. dazu (54)). Daraus ist zu entnehmen, daß sich zu diesem Zeitpunkt die Längenänderungen infolge Schwindens an den Balkenen-

den und Quellens im Balkeninneren gegenseitig aufheben, worauf auch die entsprechenden Wasserbilanzen der Bilder A 21 bis 38 im Anhang hindeuten. Erst mit fortschreitendem Alter nimmt der Einfluß des Schwindens auf die Gesamtlängenänderungen zu, so daß der entsprechende Anteil größer wird und sich die beiden Kurven in Bild 58 mehr und mehr voneinander entfernen.

Für den trockenen Zustand können die zu erwartenden Werte mit Hilfe der in Bild 53 für die Betone dargestellten Schwindmaße berechnet werden, die für den calcitischen Beton nicht mehr als $200 \mu\text{m}/\text{m}$ und für den Kiessand-Beton rd. $450 \mu\text{m}/\text{m}$ betragen. Nach vieljähriger Beheizung - vollständige Austrocknung vorausgesetzt - würden die Balken aus calcitischem Beton demnach Schwindkürzungen von rd. $500 \mu\text{m}$ und die aus Kiessand-Beton von rd. $1100 \mu\text{m}$ aufweisen, woraus sich bei Berücksichtigung der Längenänderungen infolge Temperatur insgesamt Verkürzungen von rd. $100 \mu\text{m}$ für die Balken aus calcitischem Beton und von $300 \mu\text{m}$ für die Balken aus Kiessand-Beton gegenüber dem Heizbeginn errechnen lassen, wobei - wie aus den Bildern 31 und 32 zu ersehen ist - im Einzelfall vor allem die W/Z - Werte der Betone von Bedeutung sind.

2.5.3. Druckfestigkeit

Bei der Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten, die an Bohrkernen aus den abgespaltenen Abschnitten der Balken 3 und 6 ermittelt worden waren, ergab sich zumindest qualitativ, daß beim Balken 6 im Bereich erhöhter Temperaturen höhere Druckfestigkeiten vorlagen (vgl. Bild 38 in Abschnitt 2.2.5.2), während die Druckfestigkeitsverteilung des Balkens 3 eine gegenläufige Tendenz aufwies. Es bestand Anlaß, den Kalksteinzuschlag für diese gegensätzliche Entwicklung verantwortlich zu machen. Bild 38 zeigt, daß die Druckfestigkeit des calcitischen Betons offenbar bis zu einem Abstand von etwa 125 cm von der heißen Stirnseite (entsprechend 80 bis ca. 50°C) beeinträchtigt worden ist. Um nachzuweisen, daß die Festigkeitseinbuße unmittelbar mit der Einwirkung der Temperatur in Zusammenhang steht, wurden aus den Abschnitten K/L bis Q/X des Balkens 3, deren Festigkeitsentwicklung durch die Temperatureinwirkung scheinbar unbeeinflusst geblieben war, nochmals jeweils 6 Bohrkern mit 5 cm Durchmesser und 5 cm Höhe entnommen und deren Druckflächen mit Zementmörtel abgeglichen. Jeweils 3 Bohrkern

eines Abschnittes lagerten 50 Tage bei 70°C und rd. 100 % rel. Feuchte, bis sie zusammen mit den übrigen Kernen im feuchten Zustand auf Druckfestigkeit geprüft wurden.

In Bild 59 sind die Ergebnisse der Untersuchung auf Druckfestigkeit an den derart behandelten und den unbehandelten Probekörpern gegenübergestellt. Dem darüber angeordneten Diagramm ist die Temperaturverteilung im Balken und die Art und Dauer der Nachbehandlung zu entnehmen. Trotz der erwartungsgemäß großen Streuungen, die bei der Druckfestigkeitsprüfung an kleinen Probekörpern auftreten, läßt sich deutlich erkennen, daß die Temperaturbehandlung zu einer Minderung der Druckfestigkeit geführt hat.

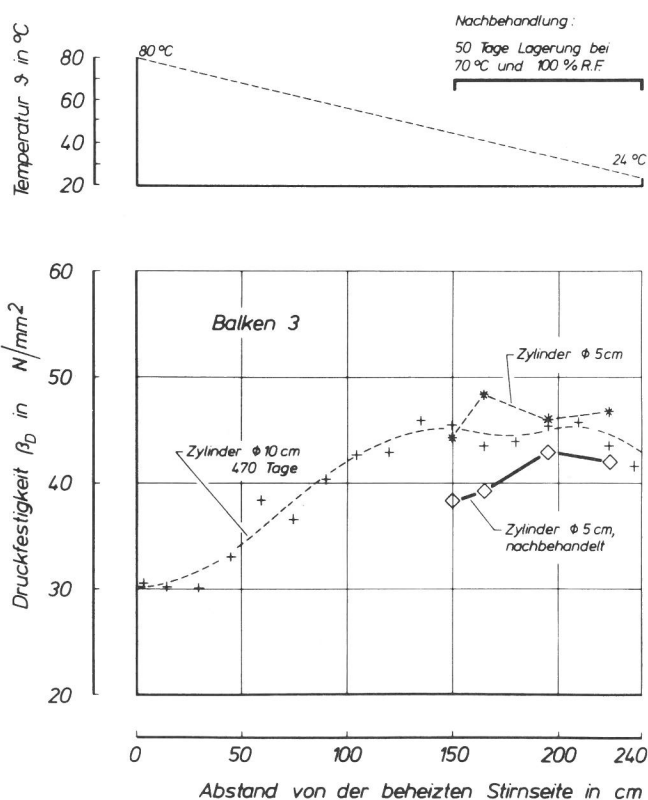


Bild 59
Beeinträchtigung der Druckfestigkeit (β_D) von Bohrkernen aus calcitischem Beton durch thermische Nachbehandlung (vgl. auch Bild 38)

2.5.4. Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt

Die während des Versuchs durch den Balken von der Heizplatte abfließende Wärmemenge kann zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Betons herangezogen werden, sofern vorausgesetzt werden darf, daß die durch den Balkenquerschnitt beförderte Wärmemenge konstant und unabhängig von dessen Entfernung von der heißen Stirnseite ist und die Stromlinien der Wärmeströmung parallel zur Balkenlängsachse laufen.

Nach der Theorie der Wärmeleitung in festen Körpern (68) ist die Wärmestromdichte (q) proportional dem wirksamen Temperaturgradienten ($\text{grad } \vartheta$) mit der Wärmeleitfähigkeit (λ) als Proportionalitätsfaktor:

$$q = \lambda (-\text{grad } \vartheta) \quad (\text{Gl. / 5 /})$$

in Differenzenschreibweise für den ebenen Fall:

$$q = -\lambda \frac{\Delta \vartheta}{\Delta l} \quad (\text{Gl. / 6 /})$$

mit $\Delta \vartheta_n = \vartheta_n - \vartheta_{n+1}$ für z. B. einander folgende Meßebenen und l als Meßebenenabstand.

Der während der Zeit (t) in Richtung des Temperaturgefälles aufgetretene Wärmestrom (ϕ) ergibt sich aus der Wärmemenge (Q) mit dem Querschnitt (F):

$$\phi = \frac{Q}{t} = \lambda \cdot \frac{\Delta \vartheta}{\Delta l} \cdot F \quad (\text{Gl. / 7 /})$$

Die bei Anwendung der voranstehenden Beziehungen geltenden Voraussetzungen, nämlich daß keine Wärme an den Seitenflächen des Balkens verloren oder zugefügt werden darf und insbesondere auch, daß der durchströmte Körper homogen und isotrop wirken muß, ließen sich praktisch nur näherungsweise erfüllen. Einerseits hätte auch bei Verwendung einer dickeren Wärmedämmschicht mit hohem Wärmedurchlaßwiderstand und dichter Anordnung der Gegenheizbänder eine Beeinflussung der Wärmeleitung durch Randeffekte nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Andererseits war mit fortschreitendem Reifen des Betons und infolge der durch Trocknung und Befeuchtung bedingten Änderungen seiner kalorischen Eigenschaften mit einer Beeinträchtigung des Temperaturfeldes bzw. der Wärmeströmung zu rechnen. Diese Einflüsse waren über die gesamte Versuchszeit nach Heizbeginn von Bedeutung. Während der Aufheizphase war zu erwarten, daß beachtliche Wärmemengen beim Aufbau des Temperaturfeldes vom Beton und den Materialien des Versuchsaufbaues je nach Wärmekapazität aufgenommen und daß beim Ansteigen der Temperatur durch physikalische und chemische Vorgänge die Wärmebilanz beeinflusst würde.

Abgesehen von den bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit vorzunehmenden Vereinfachungen war anzunehmen, daß die Messungen der Wärmestromdichte Aufschluß über Änderungen der Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung geben würden.

Wie sich aus der Entwicklung der Wärmestromdichten in Bild 14 sowie den Temperaturverteilungen über die Balkenlänge der Bilder 11 und 12 entnehmen läßt, kann für Betonalter oberhalb von ca. 140 Tagen offenbar mit annähernd stationären Bedingungen für den Wärmestrom gerechnet werden, so daß Gl. / 7 / zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit an den einzelnen Balkenabschnitten in Abhängigkeit vom Betonalter herangezogen werden konnte. Für die 17 Abschnitte ergaben sich nach Berücksichtigung eines anhand von Kontrollmessungen der Wärmestromdichte - insbesondere auch an den freien Stirnseiten der Balken - ermittelten Korrekturgliedes die im Bild 58 für die Balken 2 und 5 charakteristischen Abhängigkeiten der Werte ($q \cdot \Delta l / \Delta \vartheta$) vom Betonalter. Die Ausgleichskurven sind aus den bereits erläuterten Gründen als Einlaufkurven für den quasi-stationären Fall (etwa nach dem 140. Tage) anzusehen und sind - wie auch die nachfolgend abgeleiteten Beziehungen - aufgrund der geschilderten Vereinfachungen als Näherungen zu betrachten. Bei fortschreitender Trocknung bis zum vollständigen Verlust des verdampfbaren Wassers ließe sich für jeden Balkenabschnitt anhand solcher in Bild 60 dargestellter Wärmeleitfähigkeitswerte - bei Voraussetzung stationärer Bedingungen - die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt für Temperaturen zwischen ca. 20 und 80 °C ableiten. Wie die Wasserbilanzen (Bilder 57 und A 23, 26, 32 und 35 des Anhangs) zeigen, war die Austrocknung der Balken jedoch noch nicht so weit fortgeschritten, daß eine derartige Auswertung zweckmäßig gewesen wäre. Bild 61 - in dem die Wärmeleitfähigkeitswerte abhängig vom Wassergehalt, jedoch zunächst ohne Berücksichtigung der Temperatur angetragen worden sind - läßt vielmehr deutlich erkennen, daß sich die Daten vor allem im Bereich hohen Wassergehaltes konzentrieren. Bei näherer Untersuchung ihrer Zugehörigkeit zu bestimmten Temperaturbereichen deuteten sich Abhängigkeiten an, die den von K r i s c h e r (59) erläuterten Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung in feuchten Stoffen entsprachen. Danach müssen neben der Wärmeleitung im Feststoffgerüst vom Feuchtigkeitsgehalt und von der Temperatur abhängige Vorgänge unterschieden werden. So ist für die Erhöhung der Wärmeübertragung in feuchten Stoffen gegenüber trockenen Stoffen im hygroskopischen Bereich die Wasserdampfdiffusion verantwortlich. Die durch Dampfdiffusion bedingte Wärmeleitung ist stark temperaturabhängig und übersteigt unter

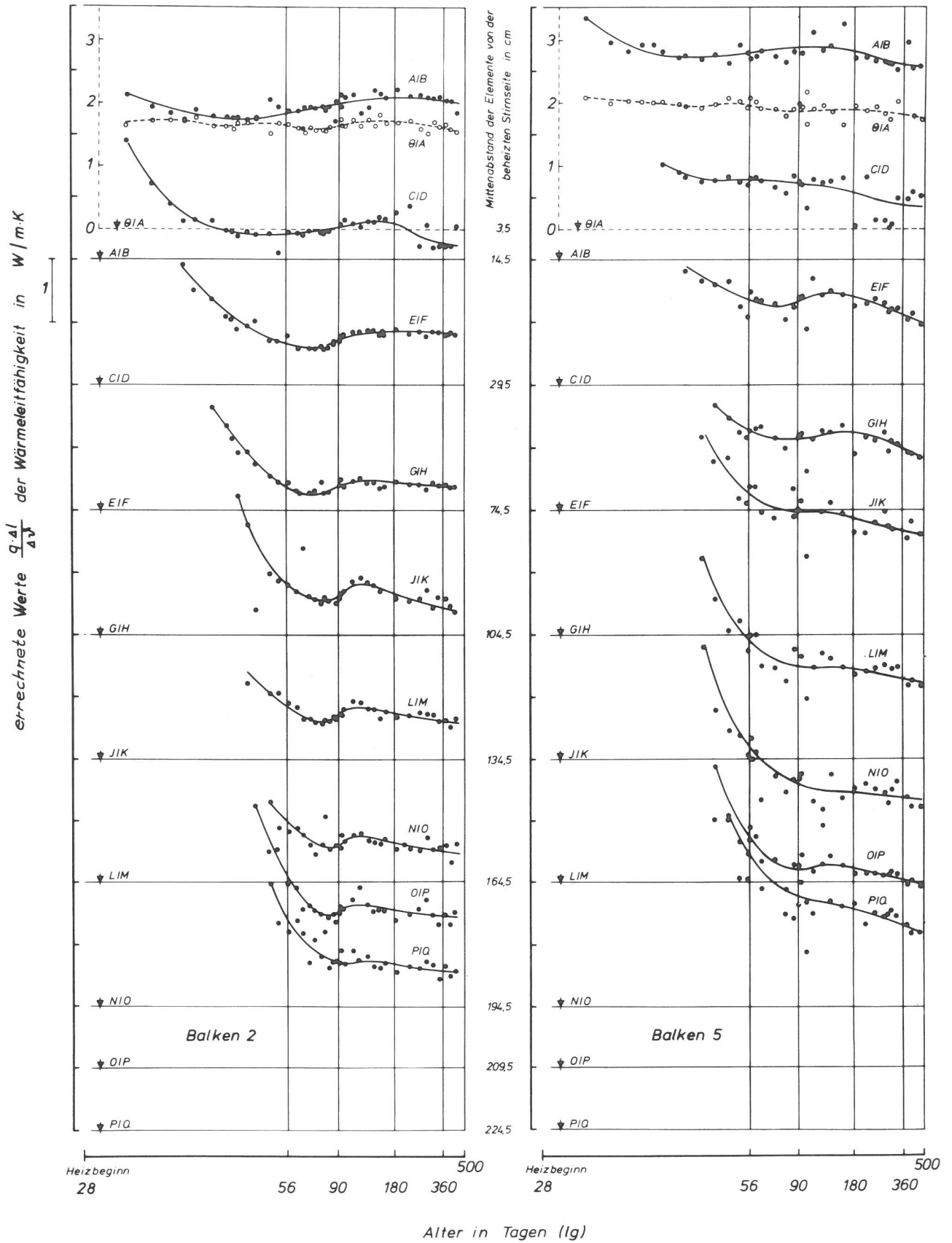


Bild 60
 Errechnete Werte ($q \cdot \Delta l / \Delta v^3$) der Wärmeleitfähigkeit für ausgewählte Abschnitte $\theta/A \dots P/Q$ der Balken 2 und 5 in Abhängigkeit vom Alter

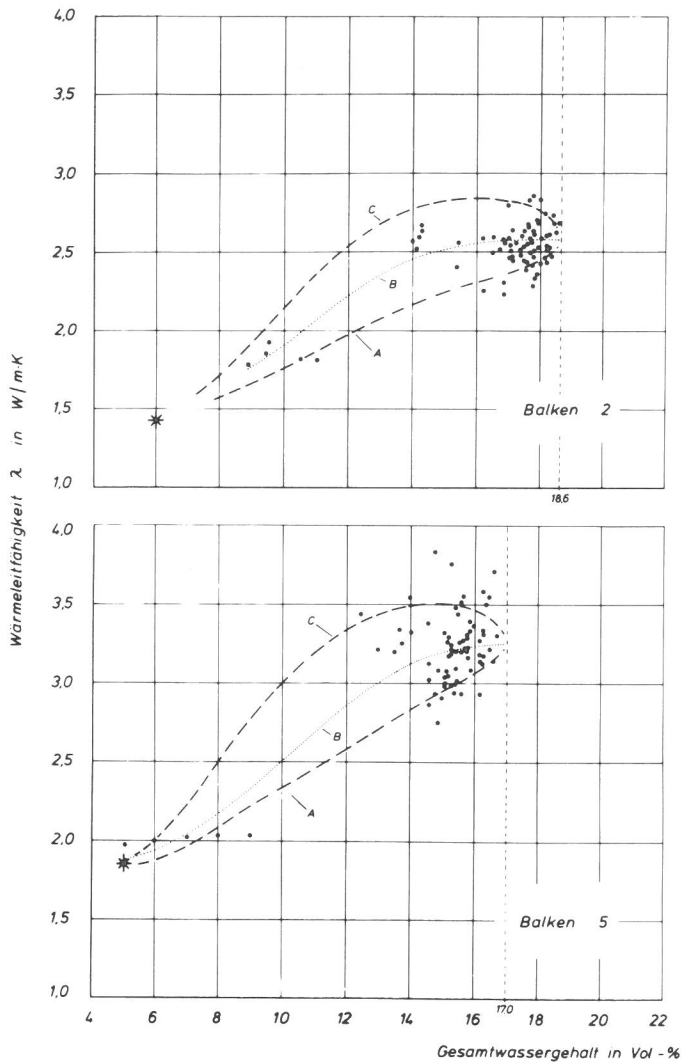


Bild 61
Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (λ) vom Gesamtwassergehalt für Temperaturen zwischen ca. 20°C (Kurve A) und ca. 80°C (Kurve C) von calcitischem Beton (Balken 2) und Kiessand-Beton (Balken 5) mit Ausgleichskurve (B); siehe auch Bild A 39

Normaldruckbedingungen bei Temperaturen über $59,3^\circ\text{C}$ die Wärmeleitfähigkeit von Wasser. Von anderen Autoren (z. B. (94)) werden höhere Werte angegeben.

Die in Bild 62 aus (59) übernommene Darstellung veranschaulicht die genannten Erscheinungen. Sie zeigt die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt für Temperaturen $\vartheta < 59^\circ\text{C}$ (Fall a) und $\vartheta > 59^\circ\text{C}$ (Fall b). Demnach sind für Feuchtigkeitsgehalte zwischen dem trockenen und wassergesättigten Zustand eines Stoffes verschiedene Werte für die Wärmeleitfähigkeit zu erwarten: Während die Kurve für Temperaturen $\vartheta < 59^\circ\text{C}$ stetig steigt (Fall a), erreicht sie für Temperaturen $\vartheta > 59^\circ\text{C}$ im Bereich des sogenannten hygroscopischen Feuchtigkeitsgehaltes (27) ein Maximum und nimmt

mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt ab. Für $\vartheta = 59^\circ\text{C}$ bleibt sie nach Erreichen des maximalen hygroscopischen Feuchtigkeitsgehaltes konstant.

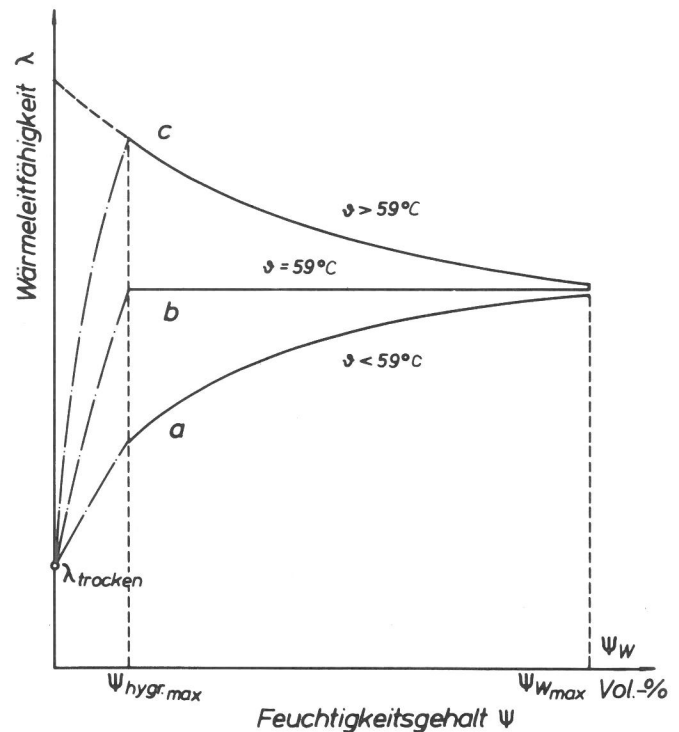


Bild 62
Charakteristischer Verlauf der Wärmeleitfähigkeit (λ) feuchter Stoffe bei verschiedenen Temperaturen nach Krischer

Da das Porensystem heterogen ist und z. B. im hygroscopischen Bereich nicht in allen Poren der Diffusionstransport stattfindet, ist der wirkliche Verlauf solcher Meßkurven ausgeglichener, als es die Darstellung des Bildes 62 erwarten läßt (vgl. (60)). In Bild 61 sind die zu erwartenden Abhängigkeiten für den calcitischen Beton (Balken 2) sowie den Kiessand-Beton (Balken 5) mit Hilfe der abgeschätzten Kurven A für Temperaturen von ca. 20°C und C für Temperaturen von ca. 80°C angedeutet. Die Kurve B, die auch in den Diagrammen des Bildes A 39 des Anhangs für die Balken 1, 3 und 4 eingezeichnet ist, diente als Hilfskurve; sie wurde aufgrund einer nicht-linearen Regression (Polynome 3. Ordnung) mit Hilfe einer EDV-Anlage gewonnen.

In die Diagramme des Bildes 61 wurden die Ergebnisse der Messungen der Wärmeleitfähigkeit (nach Trocknung der Probekörper bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz) einbezogen, die in Bild 63 dargestellt sind. Da sich bei den im Plattengerät nach DIN 52 612 (7) an Probekörpern von 5 cm Dicke und 50 cm Seitenlänge vorgenom-

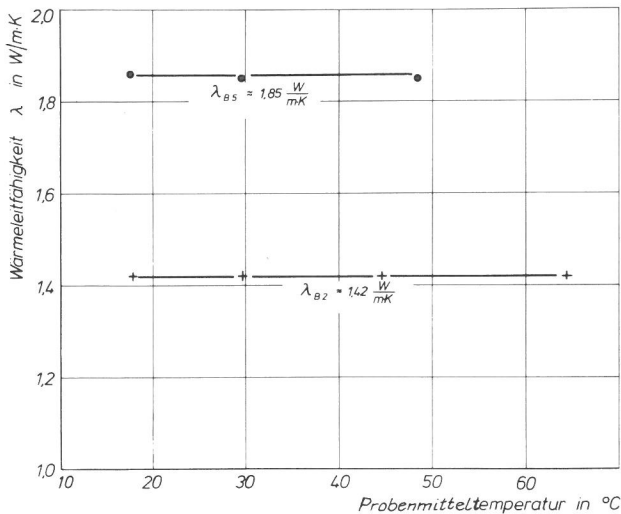


Bild 63
Wärmeleitfähigkeit (λ) in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen nach DIN 52 612 an getrockneten Proben; Mittelwerte für calcitischen Beton (Balken 2) und für Kiessand-Beton (Balken 5)

menen Messungen für die Temperaturbereiche von 18 bis 48 bzw. 64 °C keine Abhängigkeit von der Temperatur gezeigt hatte, wurden die Mittelwerte dieser Messungen von 1,42 W/m·K für den calcitischen Beton und 1,85 W/m·K für den Kiessand-Beton in die Darstellungen des Bildes 61 aufgenommen. Die Grenzlinien für den wassergesättigten Zustand wurden anhand der Kurven des Gesamtwassergehaltes, wie sie in den Beispielen der Bilder A 1 bis A 12 des Anhangs gezeigt werden, abgeschätzt (senkrechte, gestrichelte Linien); sie stellen den unter den speziellen Temperatur- und Feuchtebedingungen erreichbaren maximalen Wassergehalt dar. Abschließend sei darauf hingewiesen, daß beim tatsächlichen Verlauf der Wärmeleitfähigkeitskurven vom trockenen Zustand ausgehend zunächst ein schwacher und dann ein steiler Anstieg zu verzeichnen ist, weil der Einfluß der Dampfdiffusion im Porenraum wächst.

3. Diskussion der Untersuchungsergebnisse

3.1. Thermische Vorgänge in den Betonbalken

3.1.1. Einfluß der Hydratationswärme

Unter dem Einfluß der Hydratationswärme wurden Betontemperaturen (Bild 9) von annähernd 60 °C erreicht, obwohl die Balken an der Oberseite nicht mit der Wärmedämmung versehen waren. Bild 2, das die Temperaturentwicklung eines HOZ 350 L mit der des hier verwendeten Portlandzementes 450 F vergleicht, läßt erken-

nen, daß der Portlandzement trotz der für Zemente mit höherer Anfangsfestigkeit vergleichsweise geringen Hydratationswärme von 273 J/g nach 7 Tagen (vgl. dazu auch die Zusammenstellung in (95)) innerhalb der ersten 8 Stunden nach dem Betonieren eine heftige Wärmeentwicklung aufweist. Danach fallen die Temperaturen rasch ab und liegen bereits nach etwa 20 Stunden unterhalb der Temperaturen des HOZ 350 L. Auch wenn man berücksichtigt, daß der Zementstein bereits in den ersten Stunden vergleichsweise hohe Festigkeiten aufweisen wird, haben die aus der Temperaturerhöhung resultierenden Gefügespannungen sicherlich nachteiligen Einfluß auf die Eigenschaften der Matrix. Dies gilt vor allem für den Beton mit dem calcitischen Zuschlag, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient gegenüber dem des Zementsteins etwa um den Faktor 2 kleiner ist (vgl. Abschnitt 3.4). Darüber hinaus dürften sich bei massigen Bauteilen insbesondere dadurch Schwierigkeiten ergeben, daß aufgrund ungleichmäßiger Temperaturverteilung mit Spannungszuständen während der Anfangserhärtung zu rechnen ist (96).

3.1.2. Einfluß der Beheizung

Unmittelbar vor Heizbeginn am 28. Tag haben sich die Temperaturen in den Balken annähernd der Umgebungstemperatur angepaßt (Bild 9), nur die Kernbereiche weisen noch geringfügige Abweichungen bis maximal 2,5 °C auf. Nach Heizbeginn steigen die Temperaturen in den Meßebenen je nach Entfernung von der beheizten Stirnseite wieder an (Bilder 11 und 12). Da Wärmeverluste an den Längsseiten mit Hilfe der Heizbänder in der Wärmedämmung weitgehend kompensiert werden, stellt sich in allen Balken im Alter von etwa 50 bis 60 Tagen eine annähernd geradlinige Temperaturverteilung über die Balkenlänge ein. Die Bilder 11 und 12 zeigen etwa gleich große Temperaturdifferenzen (≙ einem Temperaturgradienten von 0,25 °C/cm) zwischen den Meßebenen, sie lassen spezifische Unterschiede für die Betonarten und die W/Z-Werte nicht erkennen. Es fällt auf und spricht für die Empfindlichkeit der Versuchsanordnung, daß Sollwertkorrekturen, die an den Reglern der Heizplatten vorgenommen werden mußten, als Schwankungen der Temperaturkurven durch den Balken weitergegeben werden. Auch die Darstellungen des Bildes 13 lassen erwartungsgemäß Unterschiede der Temperaturverteilungen in Abhängigkeit vom Alter nicht erkennen, jedoch wird deutlich, daß es bei allen Balken an der heißen Stirnseite einen "Anlaufbereich" gibt, der etwa einen Balkenabschnitt von 7 cm (Abschnitt (Θ/A) umfaßt und in dem die Temperaturverteilungskurven eine leichte Krümmung aufweisen.

Wie bereits ausgeführt (Abschnitt 2.2.1.2), können die stellenweise der Tendenz nach etwas höheren Temperaturen in den unteren Bereichender

Balkenquerschnitte durch den Einfluß der Schwerkraft auf die Feuchtigkeitsverteilung erklärt werden. Wie Pihlajavaara (97) experimentell nachgewiesen hat, beeinflusst die Schwerkraft die Feuchtigkeitsleitung in Zementmörtel. Demnach wäre auch innerhalb der Balkenquerschnitte mit einer - wenn auch geringfügigen - Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von oben nach unten zu rechnen, was z. B. für Temperaturen unterhalb von 60 °C zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.5.4) und demzufolge zur Veränderung des Temperaturfeldes führen würde. Im Rahmen einer theoretischen Untersuchung dieses Phänomens berichten Pihlajavaara und Ranta (98) auch über die Bedeutung, die der Porenstruktur in diesem Zusammenhang zukommt. Lykow (99) teilt z. B. mit, daß in Poren mit Radien $<10^4$ nm der Einfluß der Schwerkraft mit einer Genauigkeit von 6 % vernachlässigt werden kann. Im vorliegenden Fall ist davon auszugehen, daß vor allem auch Dichtestreuungen innerhalb des Betons den Einfluß der Schwerkraft überlagern, so daß eine Abhängigkeit unmittelbar nicht nachgewiesen werden kann. Allerdings deuten auch die Ergebnisse der Messungen des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Ebenen mit je zwei Feuchtigkeitsmeßelementen in einer Ebene auf einen stellenweise höheren Gehalt in den unteren Bereichen der Querschnitte (vgl. z. B. die Bilder A 30 bis 38 des Anhanges für die Balken aus Kiessand-Beton).

Die Entwicklung der Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom Alter zeigt deutliche Unterschiede (Bild 14), die - da die Versuchsbedingungen für alle Balken gleich waren - allein von der Betonart sowie den W/Z-Werten abhängig sein dürften. So ist die Wärmestromdichte für die Balken mit calcitischem Zuschlag gegenüber denen mit Kiessand-Zuschlag nach der Aufheizphase um rd. 25 % geringer. Ferner nimmt die Wärmestromdichte mit steigendem W/Z-Wert des Betons zu, und zwar bei den Kiessand-Betonen offenbar mehr als bei den calcitischen Betonen. Alle Kurven zeigen den gleichen charakteristischen Verlauf, der wie folgt gedeutet werden kann:

Die nach Heizbeginn auftretenden, anfänglich hohen Wärmestromdichten sind vor allem darauf zurückzuführen, daß die Betone und das in ihnen enthaltene verdampfbare Wasser Wärme "kapazitiv" aufnehmen, wenn die Temperaturverteilung aufgebaut wird. Dieser Vorgang ist nach 50 bis 60 Tagen weitgehend abgeschlossen, so daß nur noch die zur freien Stirnseite geleitete Wärme von den Heizplatten an die Balken abgegeben wird, d. h. die steil abfallenden Kurven knicken ab. Sie steigen jedoch nach wenigen Tagen wieder an, um nach Erreichen eines Maximums offenbar asymptotisch einem Gleichgewichtszustand zuzustreben. Der zunächst unerwartete, mit dem Auftreten eines Minimums verbundene Verlauf aller Kurven gegen Ende der Aufheizphase läßt darauf schließen, daß der Wärmestrom durch

exotherme Prozesse, die als Wärmequellen im Beton in Erscheinung treten, beeinträchtigt wird. Hierbei handelt es sich offenbar in erster Linie um durch die Temperaturerhöhung beschleunigte bzw. erst eingeleitete Vorgänge. Nach Kuhl (100) hat man sich "die hydraulische Erhärtung als einen Vorgang vorzustellen, bei dem ein energiereiches, instabiles, in ein energieärmeres, stabileres System übergeht." Bei Temperaturen oberhalb von 20 bzw. 30 °C, insbesondere aber bei der sogenannten hydrothermalen Erhärtung, sind es grundsätzlich die gleichen Prozesse, jedoch ist zu erwarten, daß sich die Lösungsgleichgewichte verlagern und der Reaktionsablauf beschleunigt wird, wobei die Wärmentswicklung zunimmt. Die Reaktionen kommen nach Erreichen des vorgegebenen Temperaturgradienten nicht sofort zum Erliegen, sondern nehmen langsam ab - wie Bild 14 erkennen läßt - etwa bis zum 120. Tag, wo die Kurven der Wärmestromdichte nur noch leicht abfallen und nachfolgend annähernd einer Geraden entsprechen, deren geringe Neigung im wesentlichen auf Änderungen der Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen ist.

Schematisch können die thermischen Vorgänge in den Balken demnach von Heizbeginn an in 3 Abschnitte unterteilt werden. Der erste Abschnitt, die Aufheizphase, ist nach etwa 50 bis 60 Tagen abgeschlossen, wenn sich in Längsrichtung der Balken eine annähernd geradlinige Temperaturverteilung eingestellt hat. Das Ende des zweiten Abschnitts im Alter von ca. 140 Tagen ist dadurch gekennzeichnet, daß der Beton selbst als annähernd frei von Wärmequellen betrachtet werden kann. Danach folgt der dritte Abschnitt, der im wesentlichen durch die Trocknungsvorgänge gekennzeichnet ist, und im Hinblick darauf, daß Strukturänderungen des Zementsteins nur noch langfristig wahrnehmbar sind, als "quasistationär" angesehen werden kann.

3.2. Hygrische Vorgänge in den Betonbalken

3.2.1. Feuchtigkeitsgehalt und chemische Bindung von Wasser

Die in Anlehnung an die Terminologie von Powers und Brownyard (14) benutzte Unterscheidung nach verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser birgt - wie bereits erwähnt - gewisse Unsicherheiten, die vor allem darin liegen, daß durch Trocknung bei 105 °C das adsorptiv im Porenraum gebundene Wasser nicht vollständig entfernt werden kann.

Im Abschnitt 2.3.1 wird ein thermogravimetrisches Verfahren herangezogen, um das Entwässerungsverhalten von Zementstein bei der Wärmebehandlung beurteilen zu können. Der Zementstein lagerte bis zu den Prüfterminen in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung. Der Porenraum kann demnach als mit Wasser annähernd gefüllt

angesehen werden; auch das durch Hydratation verbrauchte Wasser konnte ersetzt werden. Bei den im Bild 40 dargestellten Ergebnissen ist zu berücksichtigen, daß sich auch bei grosser Sorgfalt beim Zerkleinern des Probematerials (200 mg) für die thermogravimetrische Untersuchung Feuchtigkeitsverluste nicht vermeiden lassen. Da nach dem Zerkleinern des Materials zunächst Kapillarwasser abgegeben wird, weist der Zementstein mit dem höchsten W/Z-Wert auch den größten Fehler auf, d.h. die in dem rechten Diagramm des Bildes 40 für 20 °C angegebenen Kurven für Zementstein mit W/Z-Werten von 0,3, 0,4 und 0,5, die die Summe aller Gewichtsverluste bis zum Endgewicht bei 700 °C darstellen, liegen in Wirklichkeit je nach W/Z-Wert höher. Im Hinblick auf den Vergleich mit den bei der Wärmebehandlung erzielten Ergebnissen sei darauf hingewiesen, daß die Bezugstemperatur im Falle der Wärmebehandlung 1000 °C ist, was gegenüber der Endtemperatur von 700 °C bei der thermogravimetrischen Untersuchung offenbar einen etwas größeren Verlust ergibt.

Grundlage für die Diagramme der rechten Darstellung des Bildes 40 waren Meßprotokolle nach Art des Bildes 39. Dabei wurden die Bezugstemperaturen nicht willkürlich gewählt, sondern sie begrenzen charakteristische Entwässerungsvorgänge, die von einem kontinuierlichen Entwässerungsablauf überlagert werden.

Das zwischen 20 und 110 °C ausgetriebene Wasser ist zum größten Teil freies Wasser und ein gewisser Teil des adsorptiv gebundenen Wassers. C z e r n i n (101) verweist darauf, daß bei Temperaturen um 105 °C auch das Gelwasser restlos ausgetrieben werde. Ferner führt länger andauernde Temperaturbehandlung bereits unterhalb von 100 °C zur Umwandlung der Calciumsulfaluminathydrate (Ettringit, Monosulfat) unter Abgabe von Wasser (102), d.h. zu Verlusten, die im Hinblick auf den in Tabelle 2 aufgeführten Calciumsulfatgehalt des Zementes nicht vernachlässigt werden können.

Oberhalb von 100 °C verläuft die Gewichtsabnahmekurve des Bildes 39 flacher, zunächst aber mit annähernd gleichmäßigem Anstieg. An dem Gewichtsverlust zwischen 110 und 155 °C (Bild 40) ist sicherlich in geringem Umfang weiterhin adsorptiv gebundenes Wasser beteiligt, vor allen Dingen aber - da das Porenwasser bereits vollständig ausgetrieben ist - in zunehmendem Maße auch Wasser aus den Calciumsilicathydraten (CSH-Phasen). Dieser durch einen zunächst kräftigen Anstieg mit anschließendem Abflachen der Gewichtsabnahmekurven oberhalb von 155 °C (Bild 39) gekennzeichnete Entwässerungsverlauf wird durch eine von H a r m a t h y (63) mit Hilfe von thermogravimetrischen und differenzthermoanalytischen Untersuchungen getroffene Abschätzung bestätigt. Danach steigt die temperaturabhängige Veränderung ($\hat{=}$ Differentialquotient aus Reaktionsfortschritt und Temperatur)

der CSH-Phasen in einem idealisierten Zementstein oberhalb von 100 °C stark an und erreicht zwischen 150 und 200 °C ein Maximum. Nach einer Mitteilung von R a m a c h a n d r a n (103) gibt ein durch vollständige Hydratation von C₃S erhaltenes Produkt zwischen 170 und 210 °C das Zwischenschichtwasser der tobermoritähnlichen Phase ab. In den Bereich bis 200 °C fällt nach L e a (104) auch ein wesentlicher Teil der Entwässerung der Calciumaluminathydrate (CAH-Phasen).

Die CSH-Phasen geben zwischen 200 und 650 °C mit abnehmender Intensität Wasser ab, danach nimmt die Entwässerung nochmals zu und kommt oberhalb von etwa 800 °C zum Erliegen (63). Wasser aus den CSH-Phasen ist im wesentlichen für den in Bild 40 dargestellten Gewichtsverlust bis 430 °C verantwortlich (der starke Anstieg der Gewichtsabnahmekurve des Bildes 39 ist in der hohen Aufheizgeschwindigkeit - bis 380 °C - begründet). Die unmittelbar über 430 °C einsetzende Gewichtsabnahme, die durch einen abrupten Anstieg der Kurven nach Bild 39 gekennzeichnet sind und in Bild 40 mit einem Sprung der Kurven innerhalb der Temperaturstufe von 430 °C markiert werden, ist durch die Überführung des Calciumhydroxids (Ca(OH)₂) in Calciumoxid (CaO) verursacht.

Gemäß Bild 40 sind die Gewichtsverluste nach dem Zusammenbruch des Calciumhydroxids, also bis zur Temperaturstufe von 570 °C, nur noch gering. Dabei dürfte es sich überwiegend um kontinuierlich abgegebenes Wasser aus den CSH-Phasen handeln (s.o.), wie der flache Verlauf der Gewichtsabnahmekurve des Bildes 39 vermuten läßt. Der anschließende nochmalige Anstieg entspricht den Angaben in (63), wonach bis etwa 700 °C ein zweites Maximum in der temperaturabhängigen Veränderungen der CSH-Phasen auftritt. Der bei der thermogravimetrischen Untersuchung oberhalb von 700 °C nicht mehr erfaßte Wassergehalt wäre mit rd. 15 % des von den Calciumsilicathydraten insgesamt verursachten Reaktionsumfanges anzusetzen.

H a r m a t h y geht bei seinen Abschätzungen für einen idealisierten Zementstein, die der Beurteilung thermischer Eigenschaften von Betonen dienen, von der vereinfachenden Annahme aus, daß nur zwei Komponenten am Dehydratationsprozeß beteiligt sind, nämlich die CSH-Phasen und das Calciumhydroxid. Zu der mehr oder weniger kontinuierlichen Wasserabgabe tragen alle Bestandteile des Zementsteines bei. Abgesehen von den bereits erwähnten Calciumsulfaluminathydraten, die bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen umgewandelt werden, gibt u.a. auch das in der Regel nur in geringer Menge vorhandene Magnesiumhydroxid (Mg(OH)₂) unterhalb von 200 °C Wasser ab. Wie K ü h l (105) mitteilt, ist Magnesiumhydroxid bei 190 °C, wo sein

Dissoziationsdruck den Atmosphärendruck erreicht, nicht mehr beständig. Czernin (106) gibt z. B. an, daß es zunächst zur Entwässerung der tonerde- und eisenoxidhaltigen Hydratationsprodukte zwischen etwa 250 und 350 °C kommt, wobei das Calciumsilicathydrat nur etwa 20 % seines Wasseranteiles verliert, während der Hauptanteil zwischen 400 und 700 °C entweicht.

Die Beständigkeit der Hydratationsprodukte des Zementsteines hängt von den Temperatur- und den Dampfdruckbedingungen ab. Weitere Hinweise können dem Schrifttum (107, 108) entnommen werden. Dabei ist zu beachten, daß die von vielen Autoren angegebenen Temperaturbereiche jeweils von den speziellen Versuchsbedingungen abhängen. Für die vorliegende Fragestellung dürfte die vorgenommene Abschätzung des Entwässerungsverhaltens (63), die von den in Bild 39 und 40 dargestellten Ergebnissen qualitativ bestätigt wird, ausreichend sein.

Aus den im linken Diagramm des Bildes 40 dargestellten Ergebnissen der Wärmebehandlung bei 105, 550 und 1000 °C von Zementstein mit W/Z-Werten zwischen 0,20 und 0,55 läßt sich ergänzend folgendes entnehmen:

Der Gewichtsverlust bei 105 °C (Differenzen zu den 20 °C - Linien) wird mit zunehmendem Alter vor allem für die W/Z-Werte > 0,4 kleiner, was u. a. auch auf die altersabhängige Abnahme des Porenvolumens hindeutet.

Der Gewichtsverlust bei 550 °C (Differenzen zu den 105 °C - Linien) nimmt offenbar auch mit dem W/Z-Wert zu. Dies mag dadurch bedingt sein, daß zunächst die Hydratationsneigung mit steigendem Wasserangebot größer wird, so daß mehr Wasser in der Zeiteinheit chemisch gebunden wird (15). Wichtiger ist jedoch - und das wird durch den annähernd parallelen Verlauf bei gleichem Abstand der Kurven belegt - daß für W/Z-Werte < 0,4 in steigendem Maße nicht hydratisiertes Klinkerkorn zurückbleibt, das keinen Beitrag zur chemischen Bindung leistet. Wie schon im Hinblick auf die thermogravimetrische Untersuchung dargelegt, ist in diesem Gewichtsverlust auch ein Anteil des adsorptiv gebundenen Wassers enthalten.

Der restliche Gewichtsverlust bei 1000 °C ist im wesentlichen auf die Abgabe von Wasser durch CSH-Phasen zurückzuführen.

Bezüglich der Methode, den Gehalt an verdampfbarem Wasser durch Wärmebehandlung bei 105 °C zu ermitteln, ist zu sagen, daß hiermit ein nicht näher bestimmbarer Anteil an adsorptiv gebundenem Wasser nicht erfaßt wird. Anhand der Gewichtsabnahmekurven ist jedoch zu folgern, daß dieser Anteil im Vergleich zu der aus den CSH-Phasen oberhalb von 100 °C abgegebenen Wassermenge klein ist. Durch weitere Wärmebehand-

lung bei 550 °C wird der wesentliche Anteil des in den CSH-Phasen enthaltenen Wassers sowie der Hydroxylwassergehalt des Ca(OH)_2 ausgetrieben. Nicht erfaßt wird dabei jedoch die abschließende Dehydratation der CSH-Phasen, die etwa dem in Bild 40 rechts dargestellten Gewichtsverlust von 3 Gew.-% innerhalb des Temperaturbereiches von 570 bis 700 °C entspricht.

Trotz der sich überlagernden Entwässerungsvorgänge wird demnach das verdampfbare Wasser ($\hat{=}$ freies Wasser + adsorptiv gebundenes Wasser) von dem Verlust durch Trocknung bei 105 °C verhältnismäßig gut repräsentiert. Dagegen ist der Fehler bei der Bestimmung von nicht verdampfbarem ($\hat{=}$ chemisch gebundenem) Wasser durch Wärmebehandlung bei 550 °C offenbar größer. Da in die Untersuchungen auch Matrixmörtel mit Kalksteinzuschlag einzubeziehen waren, konnte eine höhere Temperatur als 550 °C wegen der Gefahr der thermischen Zersetzung des CaCO_3 nicht gewählt werden. Insofern war auch das von Czernin (109) vorgeschlagene Näherungsverfahren für Zementstein hier nicht zu verwenden.

3.2.2. Einflüsse von Hydratation und Feuchtigkeitsleitung auf den Wassergehalt

3.2.2.1. Veränderungen im abgeschlossenen System

Die in Tabelle 3 aufgeführten Frischrohdichten wurden an jeweils 6 Würfelsätzen der zur Herstellung der Balken 1 bis 6 verwendeten Betone ermittelt. Diese Werte können auf die Betone der Balken nur unter Berücksichtigung der speziellen Verdichtungsbedingungen übertragen werden. Die im oberen Teil der Tabelle 4 für die 6 Balken in Klammern angegebenen Trockenrohdichten wurden daher anhand der Betonzusammensetzungen und der Frischbetoneinwaagen unter Berücksichtigung eines Gehaltes an chemisch gebundenem Wasser von ca. 20 % des Zementgewichtes abgeschätzt. Für die Balken 3 und 6 entsprechen die Werte etwa den nach Abschnitt 2.5.5 an Proben des Balkenbetons gefundenen Mittelwerten (Tabelle 4, erste Zeile), deren Standardabweichung von $s = + 0,13 \text{ kg/dm}^3$ für beide Balken gleich groß ist. Die im Balken erzielte Verdichtung ist bestimmend für den tatsächlichen Gesamtwassergehalt des Betons (3. Zeile der Tabelle 4). Dieser bleibt bis zum Heizbeginn am 28. Tage gleich groß, wobei sich jedoch das Verhältnis von verdampfbarem zu nicht verdampfbarem Wasser infolge Hydratation ändert (Balken 1 weist stark ausgeprägte örtliche Unterschiede in der Verdichtung auf und ist daher nicht als charakteristisch anzusehen).

Daß der Anteil des nicht verdampfbaren Wassers zwischen dem 3. und 28 Tage nur noch wenig zunimmt, ist für die Matrixmörtel aus calciti-

schem und Kiessand-Beton in Bild 42 dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse für die Balken 1 bis 3 und 4 bis 6 zusammengefaßt, weil sich von den W/Z-Werten abhängige Unterschiede nicht nachweisen ließen. Beim Vergleich der beiden (langgestrichelten) Kurven fällt auf, daß der Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser des calcitischen Betons, was in erster Linie durch den höheren Zementgehalt der calcitischen Betone verursacht (vgl. Tabelle 3) und in vergleichbarer Größenordnung bei den Balkenbetonen selbst angetroffen wird (vgl. die Bilder 57 und A 21 bis A 38 des Anhanges). Die beiden bis zum Alter von 180 Tagen extrapolierten (kurzgestrichelten) Kurvenzüge des Bildes 42 deuten an, daß unter gleichbleibenden Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen nach dem 28. Tage praktisch nur noch mit einer geringen Zunahme zu rechnen wäre. Wie auch Bild 40 zu entnehmen ist, kommen die Hydratationsreaktionen oberhalb von 180 bis 360 Tagen immer mehr zum Erliegen.

Einen differenzierten Eindruck von der Entwicklung des Feuchtigkeitshaushaltes bis zum 28. Tag vermittelt Bild 41. Da das System bis zum Heizbeginn als abgeschlossen angesehen werden kann und die Probekörper aus Matrixmörtel zwischen dem 1. Tag und dem Prüftermin praktisch keine Gewichtsänderungen aufweisen, läßt sich aus den Diagrammen des Bildes 41 auf den Reifefortschritt der Betone schließen. Offenbar ist bei den Balken 4 bis 6 die Abnahme des Gehaltes an verdampfbarem Wasser zwischen dem 3. und dem 28. Tag umso größer, je höher der W/Z-Wert ist, d.h. die Menge des chemisch gebundenen Wassers nimmt mit steigendem W/Z-Wert zu. An den Kurven für die Balken 1 bis 3 läßt sich eine entsprechende Tendenz erkennen. Die Ermittlung des Gehaltes an nicht verdampfbarem Wasser durch Trocknung bei 550 °C kann wegen der in Abschnitt 3.2.1 dargelegten Gründe nur zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

3.2.2.2. Veränderungen nach Heizbeginn

3.2.2.2.1. Feuchtigkeitsverluste infolge Trocknung

Der Gesamtwassergehalt am 28. Tage ist im oberen Teil der Tabelle 4 für die 6 Balken zusammengestellt. Die Verteilungsprofile der Bilder 25 und 26 lassen erkennen, daß die Verteilungskurve bis etwa + 0,5 Vol.-% von den Mittelwerten abweicht. Bei den Balken 1 sind die Abweichungen aus den in Abschnitt 3.2.2.1 erläuterten Gründen größer. Derartige Streuungen des Gesamtwassergehaltes stehen mit Schwankungen der Rohdichte insofern in Zusammenhang, als sich an Stellen mit größerem Porenvolumen ein höherer Gehalt an verdampfbarem Wasser einstellt.

Mit Beginn der Beheizung erfolgt die Abgabe von Feuchtigkeit einseitig über die jeweils freie Stirnseite der Balken. Nach Bild 16 unterscheiden sich dabei die calcitischen Betone gegenüber den Kiessand-Betonen durch niedrigere Anfangsverluste. Danach verlaufen die Kurven qualitativ gleichartig.

Die anfänglich hohen Gewichtsverluste werden durch Feuchtigkeitsabgabe an der freien Stirnseite hervorgerufen - Vorgänge, die dem von K r i s c h e r (110) beschriebenen charakteristischen Trocknungsverlauf entsprechen. Danach wird zunächst bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit durch kapillare Leitung Wasser an die Oberfläche (freie Stirnseite) gefördert, bis zu einem Zeitpunkt, an dem der Feuchtigkeitsgehalt an der Oberfläche Null wird. Dies ist mit einem "Knickpunkt" im Trocknungsverlauf verbunden, die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt ab und der "Trocknungsspiegel" bewegt sich in das Balkeninnere. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist von den äußeren Bedingungen (Feuchtigkeitsgehalt und Strömungsgeschwindigkeit der Luft) abhängig, die für die 6 Balken als gleich angesehen werden können. Für das Auftreten des Knickpunktes sind die kapillaren Eigenschaften der Betone maßgebend. In Bild 16 wird die Änderung der Trocknungsgeschwindigkeit für Altersstufen zwischen ca. 35 und 55 Tagen durch ein "Abbiegen" der Gewichtsverlustkurven angedeutet, wobei auch eine Abhängigkeit vom W/Z-Wert der Betone, der für die Ausbildung des Kapillarporenraumes verantwortlich ist, erkannt werden kann. Die perspektivischen Darstellungen der Bilder 28 und 29 (sowie der Bilder A 13 bis A 16 des Anhanges) bestätigen diesen Zusammenhang. Bei allen Balken ändert sich der Gesamtwassergehalt der der freien Stirnseite am nächsten liegenden Ortskoordinate (Abstand von der beheizten Stirnseite $\hat{=}$ 230,6cm) sofort nach Heizbeginn (vgl. dazu auch die in den Bildern A 1 bis A 12 des Anhanges dargestellte Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser für die infrage kommenden Ortskoordinaten). Der Verlauf der Kurven in Bild 16 darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß das Auftreten des Knickpunktes zeitlich nicht mit dem Ende der Aufheizphase identisch ist. Die an der Abgabe von Feuchtigkeit beteiligten Balkenabschnitte haben zwar eine Temperaturerhöhung erfahren, aber den quasi-stabilen Zustand (vgl. Abschnitt 3.1) noch nicht erreicht. Nach dem Abbiegen der Kurven ist der Gewichtsverlust der Tendenz nach linear vom Alter abhängig. Eine entsprechend der Theorie (110) für einen einseitig austrocknenden Körper (mit kapillar-hygrokopischem Austrocknungsverhalten) zu erwartende kontinuierliche Abnahme mag zwar vorhanden sein, diese ist jedoch durch thermisch bedingten Feuchtigkeitsnachschieb überlagert, so daß die Gewichtsverlustkurven annähernd geradlinig ansteigen. Die Balken mit den Kiessand-Betonen weisen jetzt offenbar leicht unterschiedliche

Trocknungsgeschwindigkeiten auf, und zwar scheinen diese umso größer zu sein, je höher der W/Z-Wert ist. Das ist nicht verwunderlich, da die Permeabilität des Porensystems mit dem vom W/Z-Wert abhängigen Anteil an Überschußwasser wächst.

Wie die Wasserbilanzen der Bilder A 21 bis 36 im Anhang zeigen, ändert sich die Verteilung des verdampfenden Wassers in dem Balkenabschnitt an der freien Stirnseite nach Erreichen des Knickpunktes nur noch sehr langsam, und zwar - soweit sich das erkennen läßt - durch Trocknung im Bereich des hygroskopischen Feuchtigkeitsgehaltes. Die Gewichtsverluste sind auf Vorgänge zurückzuführen, bei denen infolge der Beheizung Feuchtigkeit aus dem Balkeninneren zu dem nur sehr langsam in den Balken vordringenden Trocknungsspiegel gefördert wird. Wenn man zunächst die Frage nach der durch die Temperaturerhöhung beeinflussten chemischen Bindung von Wasser vernachlässigt, dann lassen sich diese thermisch bedingten Vorgänge anhand der Änderungen des Gesamtwassergehaltes (Bilder 28 und 29 sowie die entspr. Wasserbilanzen der Bilder A 21 - 36 des Anhangs) in der nachfolgend beschriebenen Weise deuten.

3.2.2.2.2. Deutung des Trocknungsverlaufes unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

Durch die Wärmezufuhr wird das Wasser je nach Höhe der erreichten Temperatur in einen gegenüber dem Heizbeginn angeregten Zustand versetzt, was insbesondere höhere Mobilität der Wassermoleküle zur Folge hat. Dieses energetisch im Ungleichgewicht stehende System strebt einen neuen Gleichgewichtszustand an. Das Ungleichgewicht ist durch Druck- und Konzentrationsunterschiede gekennzeichnet, die sich zuerst innerhalb der nächsten Umgebung auszugleichen versuchen, aber auch die treibende Kraft für die zur freien Stirnseite der Balken einsetzende "großräumige" Feuchtigkeitsleitung darstellen.

So sind die anfangs ausgeprägten Schwankungen des Gesamtwassergehaltes vermutlich damit zu erklären, daß innerhalb kleiner Bereiche zeitlich abhängig verschiedene Beförderungsarten vorherrschen, so daß z. B. durch Beförderung in Richtung eines Druckgradienten hervorgerufene Konzentrationen von freiem Wasser durch entgegengesetzt gerichtete Kapillarleitung wieder rückgängig gemacht werden. Besonders große Schwankungen des Gesamtwassergehaltes sind bei Balken 1 festzustellen, was die naheliegende Vermutung bestätigt, daß diese vor allem durch lokale Unterschiede im Verdichtungsgrad des Betons verstärkt werden. Zonare Rohdichteschwankungen dieser Art sind im Beton praktisch nicht zu vermeiden und beeinflussen vor allem den Anteil an großen Poren. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß es sich ohne Zweifel um

Schwankungen des Gehaltes an freiem Wasser handelt, die gemäß Bild 20 zwar auch von den Feuchtigkeitsmeßelementen erfaßt, aber aufgrund der vereinfachenden Auswertung in den Bildern A 1 bis 12 des Anhangs ausgeglichen werden. Die in Bild 37 für die Balken 3 und 6 dargestellten Werte für die Wasseraufnahme (A) mögen als Maß für das Porenvolumen und die zu erwartenden Dichtestreuungen der calcitischen und der Kiessand-Betone dienen.

Überlagert von den Schwankungen verläuft die Entwicklung des Gesamtwassergehaltes - also der "großräumig" wahrnehmbaren Vorgänge, deren Wirkung die Gewichtsverlustkurven des Bildes 16 wiedergeben - bis zum Betonalter zwischen ca. 150 und 300 Tagen der Tendenz nach zunächst geradlinig fallend. Das läßt sich bei den Ortskoordinaten in unmittelbarer Nähe der heißen Stirnseite deutlich erkennen. In diesem Abschnitt ist die Trocknungsgeschwindigkeit konstant. Danach nimmt sie ab und geht langsam gegen Null.

Bild 64 gibt eine schematisierte Darstellung des Trocknungsverlaufes, wie er für die Ortskoordinaten 8,3; 11,0 und 52,0 cm den Bildern A 1 bis 12 des Anhangs entnommen werden kann. Auf den Abszissen ist das Alter und auf den Ordinaten der Gesamtwassergehalt angetragen. Bis zum 28. Tag ist er konstant, steigt nach Heizbeginn erst an und fällt dann geradlinig ab. Der Knickpunkt der Kurven tritt umso später auf, je größer der Abstand des Meßortes von der beheizten Stirnseite ist. Auch wird die unmittelbar nach Heizbeginn auftretende Zunahme des Gesamtwassergehaltes mit wachsendem Abstand größer, und zwar bis der zur Verfügung stehende Porenraum vollständig mit Wasser aufgefüllt worden ist.

Die Trocknungsgeschwindigkeit der nachfolgenden (geradlinigen) Abschnitte (Bild 64), ist offenbar - wie aus den unterschiedlichen Steigungen ($\tan \alpha$) der Geraden sowie deren Längen abzuleiten ist - für die Betone verschieden und im übrigen auch von der Lage im Balken abhängig, d. h. sowohl die Temperatur als auch die speziellen Eigenschaften des Porensystems sind von Einfluß auf den Trocknungsverlauf. Der Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit endet, wenn die größeren Poren entleert sind und der hygroskopische Wassergehalt abgegeben werden muß. Da dieser Wassergehalt, der sich aus freiem Wasser in den engen Poren und adsorptiv gebundenem Wasser zusammensetzt, nur sehr langsam bzw. nur zum Teil abgebaut wird, ist im Versuchszeitraum auch für die heiße Stirnseite mit einer Temperatur von $\vartheta = 80^\circ\text{C}$ eine Austrocknung allen verdampfenden Wassers nicht zu erwarten (vgl. die Wasserbilanzen in Bild 57).

In Bild 64 ist deutlich zu erkennen, daß bei beiden Betonarten für die Ortskoordinate 52,0 cm der Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit auch im Alter von 450 Tagen noch nicht

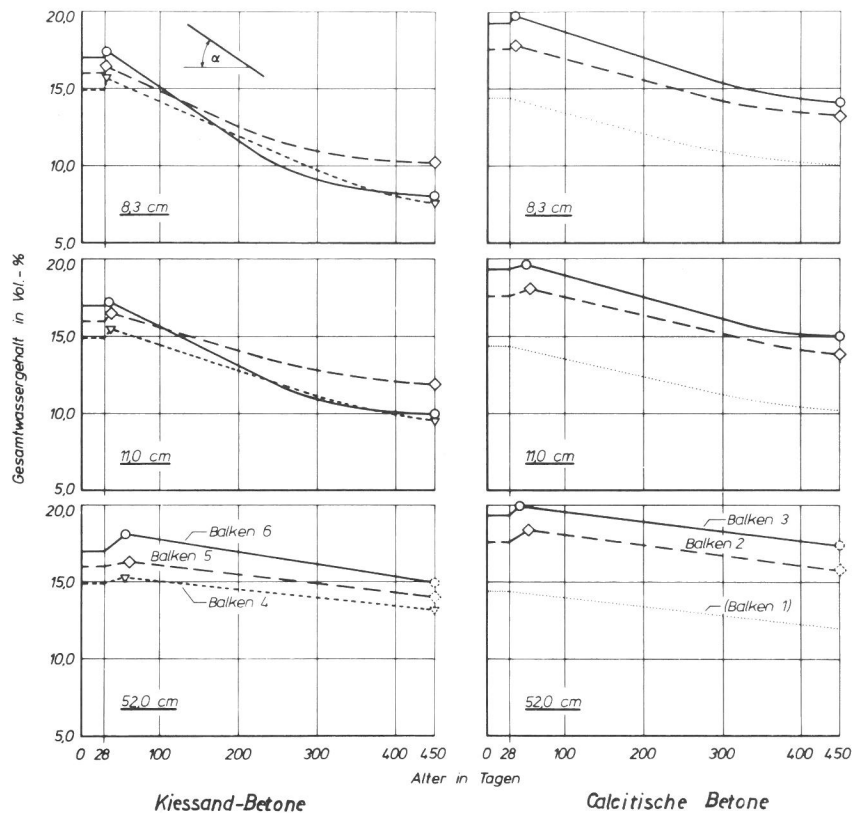


Bild 64
 Schema der Entwicklung der Gesamtwassergehalte im Abstand von 8,3;
 11,0 und 52,0 cm von der beheizten Stirnseite der Balken 4 bis 6 bzw.
 1 bis 3 (abgeleitet aus den Bildern A 1 bis 12 des Anhangs)

abgeschlossen ist. Mit zunehmender Entfernung von der beheizten Stirnseite wird die Trocknungsgeschwindigkeit kleiner und der Übergang zum Abschnitt mit fallender Geschwindigkeit weniger ausgeprägt. Die Trocknungskurven für die Balken 2 und 3 bzw. 4 und 5 sind offenbar weitgehend ähnlich. Sie zeigen etwa die gleiche Neigung und sind anscheinend nur um einen durch den jeweiligen W/Z -Wert bedingten Betrag gegeneinander versetzt. Da an entsprechenden Ortskoordinaten gleiche Temperaturbedingungen herrschen, ist für den durch konstante Geschwindigkeit gekennzeichneten Abschnitt mit gleichartigen Leitungseigenschaften zu rechnen. Abweichungen dürften jedoch im Hinblick auf den hygroskopischen Bereich bestehen, was sich auch aus der unterschiedlichen Länge der Abschnitte auf der Zeitachse ableiten läßt. Demnach sind das Trocknungsverhalten beeinflussende Unterschiede in der Porenstruktur der beiden Betone (vorwiegend im Bereich der kleinen Poren) zu erwarten.

3.2.2.2.3. Nicht verdampfbares Wasser

Die Wasserbilanzen (Bilder 57 und A 21 bis 38 des Anhangs) wurden in Ergänzung zu den Kurven der Wassergehalte der Bilder A 1 bis 12 des

Anhangs mit dem Ziel aufgestellt, den Einfluß der Temperatur- und Feuchtebedingungen auf die Hydratationsreaktionen zu verdeutlichen. Wegen des Versagens einiger Feuchtigkeitsmeßelemente stehen für die Balken 1 bis 3 nur wenige Meßpunkte zur Verfügung. Die Betrachtung beschränkt sich daher im wesentlichen auf die Verteilung des nicht verdampfbareren Wassers in den Balken 4 bis 6. Diese lassen insgesamt wesentliche Unterschiede nicht erkennen. Möglicherweise führt das langwährende Angebot an verdampfbareren Wasser zu einem geringfügig höheren Gehalt an nicht verdampfbareren Wasser, was allerdings in den heißen Bereichen der Balken - auch bei ausreichendem Feuchtigkeitsangebot - nicht zu erwarten ist, da dort eher kristalline Bildungen entstehen (111), die wasserärmer sind. Diese Tendenz ist auch aus Bild 42 abzuleiten, das für die Matrixmörtel beider Betonarten eine Abnahme des Gehaltes an nicht verdampfbareren Wasser in höherem Alter zeigt, und zwar unabhängig von den örtlichen Temperaturbedingungen. Die unmittelbar nach Heizbeginn bei den calcitischen Matrixmörteln angetroffene auffällige Erhöhung des Gehaltes an verdampfbareren Wasser könnte insofern in Zusammenhang mit der in Abschnitt 3.4 behandelten Bildung von Mikrorissen stehen, als die-

se Risse zur Aufnahme des aus der heißen Zone beförderten Wassers zur Verfügung gestanden haben. Die abschließend an Betonproben aus den Balken 3 und 6 ermittelten Gehalte an nicht verdampfbarem Wasser (■ - Symbole) zeigen nur geringe Schwankungen. Die diesen Daten entsprechenden Mittelwerte sind in allen Wasserbilanzen angetragen (lang-gestrichelte Linien). Sie liegen aus den in Abschnitt 3.2.1 besprochenen verfahrensbedingten Gründen etwas unterhalb des tatsächlichen Gehaltes.

3.2.3. Vergleich der Ergebnisse

Bedauerlicherweise werden die Ergebnisse der Untersuchungen anderer Autoren (44 - 47) meist nur pauschal mitgeteilt (vgl. Abschnitt 1.2.2). Es fehlen vor allem Darstellungen über den örtlichen Trocknungsverlauf in Abhängigkeit vom Alter. England und Ross (47) geben Wassergehaltsverteilungen ähnlich den Wasserbilanzen nach Bild 57 für Balken mit Längen zwischen 0,6 und 3,1 m an, die an der geschlossenen Seite auf 80 bzw. 125 °C erhitzt wurden. Qualitativ stimmen diese nach verschiedener Beheizungszeit in den Balken festgestellten Verteilungen mit den vorliegenden Ergebnissen überein, wenn man z. B. den Einfluß der höheren Temperatur, der die geschlossene Stirnseite ausgesetzt war, auf den Trocknungsverlauf berücksichtigt, und in Betracht zieht, daß aufgrund der Versuchsanordnungen offenbar kein konstanter und gleichgerichteter Wärmestrom in den Balken gewährleistet war. Daß Mc Donald (48) bei seinen Untersuchungen im Bereich der heißen Stirnseite (ca. 65 °C) nur geringfügige Veränderungen feststellt, mag u. a. an dem niedrigen Temperaturgradienten sowie dem kurzen Beheizungszeitraum gelegen haben. Der Autor betont daher auch, daß seine Untersuchungen noch nicht abgeschlossen seien.

Yuan, Hilsdorf und Kessler haben das Trocknungsverhalten von Zementmörtelzylindern bei unterschiedlichen W/Z-Werten, Temperaturen und Luftfeuchten bestimmt (112). Diese systematische Untersuchung ergibt, daß der Feuchtigkeitsverlust des Betons eine Funktion aller drei Variablen ist. Mit abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt läßt jedoch der Einfluß der Temperatur und der relativen Feuchte nach. Dies entspricht grundsätzlich den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, wonach Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt und die Struktur des Porenraumes den Trocknungsvorgang bestimmen. Das von den Autoren angegebene Trocknungsschema (112) ist jedoch nur für konstante äußere Bedingungen anwendbar.

Bei der Entwässerung der Balken kann man demnach davon ausgehen, daß die Gewichtsverlustkurven (Bild 16) zunächst noch weiter annä-

hernd linear verlaufen werden, und zwar so lange, bis der nach Heizbeginn angereicherte und dann durch Abgabe von Wasser bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit entleerte Porenraum der kühleren Balkenabschnitte überwiegend hygroskopisches Wasser enthält. Die für diesen Vorgang notwendige Zeit ist von der örtlichen Feuchtigkeitsleitfähigkeit des Porensystems sowie von der Temperatur abhängig, ferner auch von der Feuchtigkeitsmenge, die aus dem jeweils benachbarten, heißeren Abschnitt gefördert werden muß. Darauf verlaufen die Gewichtsverlustkurven der Balken (Bild 16) zunehmend flacher und nähern sich asymptotisch einem Endwert, d. h. die Trocknungsgeschwindigkeit geht gegen Null. Der Endwert ist durch die temperaturabhängigen Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalte gekennzeichnet; in (112) sind entsprechende Werte für Zementmörtel angegeben. Der Abschnitt fallender Trocknungsgeschwindigkeit wird von erheblich längerer Dauer sein als der vorhergehende Abschnitt. Bild 57 macht deutlich, daß sowohl Balken 3 als auch Balken 6, die sich beide noch im Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit befinden, nach mehr als 400-tägiger Beheizung im Zentrum (ca. 0,6 bis 2,1 m von der beheizten Stirnseite entfernt) nur zwischen 1 und 2 Vol.-% Wasser verloren haben.

3.3. Einfluß der thermisch-hygrischen Vorgänge auf die Porenstruktur

3.3.1. Gesamtporosität und offene Porosität

In Abschnitt 2.3 sind die mit chemischen und physikalischen Vorgängen im Zementstein verbundenen Änderungen des Porenraumes untersucht worden. Die anhand von Dichte- und Rohdichtemessungen bestimmte Gesamtporosität (U_t) kann annähernd dem tatsächlichen Porenraum gleichgesetzt werden. Dagegen wird mit dem Quecksilberporosimeter nur ein Teil des offenen Porenraumes, und zwar im Radienbereich zwischen ca. $55 \cdot 10^3$ und 4 nm gemessen. Die Porenvolumina (U_{Hg}) des Bildes 47 sind demzufolge auch kleiner als die Gesamtporositäten nach Bild 43 (die entsprechenden Porenvolumina würden sich durch Division mit $\rho_{tr} \cdot 10^2 \approx 2,3 \cdot 10^2$ (g/cm³) ergeben). Sie entsprechen im wesentlichen dem Kapillarporenraum, dessen kleinste Porenradien vermutlich 3 bis 4 nm betragen (20). Die Differenz aus Gesamtporosität (U_t) und Porenvolumen (U_{Hg}) kennzeichnet demnach den Gelporenraum mit mittleren Porenradien zwischen 1 und 2 nm (14) und Maxima bei 1,5 nm (21).

Die dem tatsächlichen Porenvolumen des Betons zuzurechnenden Grobporen sind in den Wasseraufnahmewerten (A) des Bildes 37 links (in Abschnitt 2.2.5) für Betonproben der Balken 3 und 6 mitenthalten. Bild 37 rechts ist die Größenordnung des (offenen) Porenraumes zu entnehmen, der zusätzlich unter Druck bei 150 bar mit Was-

ser gefüllt werden kann. Dieser Anteil ist bei beiden Betonarten etwa gleich groß und vom W/Z-Wert innerhalb des untersuchten Bereichs unabhängig, wie die an gesondert hergestellten Probekörpern ermittelten Werte zeigen.

Nach Bild 44 ist die Gesamtporosität (U_t) von Zementstein, der in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung lagert, unmittelbar vom W/Z-Wert abhängig. Sie wird mit fortschreitendem Alter geringer. Beide Abhängigkeiten sind im Zusammenhang mit der Festigkeitsentwicklung zu sehen und insofern von besonderer technologischer Bedeutung (113). Für Zementstein mit W/Z-Werten $> 0,4$ endet bereits nach ca. 28 Tagen die logarithmische Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Alter und erreicht nach etwa 360 Tagen einen annähernd konstanten Wert. Hingegen nimmt die Gesamtporosität für die W/Z-Werte $< 0,4$ weiter ab.

Bild 43 zeigt, daß die zeitabhängig kontinuierliche Abnahme der Gesamtporosität des Matrixmörtels durch die Beheizung unterbrochen wird. Bei den calcitischen Betonen, die gegenüber den Kiessand-Betonen von vornherein eine höhere Gesamtporosität aufweisen, sind die Auswirkungen der Temperaturerhöhung im Bereich der Fenster 1 bis 3 offenbar schwerwiegend. Während sich für die Kiessand-Betone ebenso wie für die kühleren Bereiche der calcitischen Betone nur eine temperaturabhängige Verschiebung der Kurven andeutet, nimmt in den heißen Bereichen der calcitischen Balken die Gesamtporosität auch während des hinsichtlich der Temperaturverteilung quasi-stabilen Abschnittes (vgl. Abschnitt 3.1) nicht wesentlich ab. Dies kann nur zum Teil mit Strukturänderungen des Zementsteins erklärt werden, und ist vermutlich hauptsächlich auf vom Zuschlag bedingte Ursachen (Rißbildung in den Verbundzonen bei der thermischen Ausdehnung) zurückzuführen, die in Abschnitt 3.4 behandelt werden.

Bild 47 zeigt die mit dem Quecksilberporosimeter an den Matrixmörteln der Balken 1 bis 6 gemessenen Porenvolumina (U_{Hg}) und deren Entwicklung. Das Porenvolumen ist umso größer, je höher der W/Z-Wert ist; es nimmt für alle W/Z-Werte mit fortschreitendem Alter in ähnlicher Weise ab. Durch die am 28. Tag begonnene Beheizung wird die altersbedingte Verringerung des Porenvolumens unterbrochen. Im Bereich der erhöhten Temperaturen wachsen die Porenvolumina (U_{Hg}) zunächst nochmals an, nehmen aber später wieder ab. Die durch den lokalen Temperaturanstieg bedingte Zunahme des Porenvolumens ist bei den Matrixmörteln der calcitischen Betone ebenfalls besonders groß (s.o.).

3.3.2. Porengrößenverteilung

3.3.2.0. Beurteilung des Meßverfahrens

Ziel der in Abschnitt 2.3.4 erläuterten Untersuchungen der Porengrößenverteilung war es, die Entwicklung der Porengrößen der Betone in Abhängigkeit vom Alter und den örtlich veränderlichen Temperatur- und Feuchtebedingungen im Balken zu kennzeichnen. Bei der Auswertung der Meßergebnisse waren die dem Quecksilberporosimeterverfahren eigentümlichen Fehlereinflüsse (87) zu berücksichtigen. Insbesondere mußte beachtet werden, daß das im Bereich der kleinsten erfaßten Poren liegende Maximum der Porenradienverteilung nur scheinbar ist, weil sich dort die Erfassungsgrenze des Verfahrens befindet. Dies kann mittels Sorptionsmessungen nachgewiesen werden (82, 92). Jung (92) geht zwar von der Annahme aus, daß in den Maxima ein Teil der noch kleineren Poren des Gelporenbereiches miterfaßt ist; dieser Anteil kann jedoch nicht groß sein.

Unter normalen Erhärtungsbedingungen nimmt der Kapillarporenraum ab, weil die Hydratationsprodukte in diesen hineinwachsen bzw. sich dort bilden und auf diese Weise gleichzeitig der Gelporenraum vergrößert wird (vgl. Abschnitt 1.1). Die Umlagerung der Porenraumanteile gibt das Quecksilberporosimeterverfahren nur unvollständig wieder. So ist die Bild 47 zu entnehmende Verringerung des Porenvolumens (U_{Hg}) auch ein Spezifikum des Meßverfahrens. Diamond (114) schätzt das durch die Quecksilberporosimetrie erfaßbare Porenvolumen je nach Reifezustand des Zementsteins auf 83 bis 55 % (vgl. auch (16)).

Es ist nicht anzunehmen, daß unterschiedliche Entwicklungsstadien des Porenraumes von wesentlichem Einfluß auf den durch Porenradien von ca. 4 nm nach unten begrenzten Erfassungsbereich des Meßverfahrens sind. Insofern können die relativen Änderungen der Häufigkeitsverteilungen als typisch für die Porenspektren angesehen werden.

3.3.2.1. Zementstein und Zuschläge

Bild A 19 des Anhangs zeigt an in gesättigter $Ca(OH)_2$ -Lösung gelagerten Zementsteinproben mit verschiedenen W/Z-Werten, daß auch im Alter von 180 bis 470 Tagen noch beachtliche Veränderungen des Porengefüges zu erwarten sind. Ferner ist den beiden Diagrammen zu entnehmen, daß das mit der Quecksilberporosimetrie erfaßte (Kapillar-) Porenvolumen umso größer ist, je höher der W/Z-Wert liegt. Da bei niedrigeren W/Z-Werten eine nur geringe Verschiebung der Porenradienverteilungen zu kleineren Radien auftritt, ist unter normalen Erhärtungsbedingungen damit zu rechnen, daß das - zur Hydratation

nicht benötigte - Überschußwasser im wesentlichen die Bildung von Kapillarporenraum verursacht und daß das Gelporenvolumen davon nicht beeinflußt wird.

Wie aufgrund der in Bild A 20 dargestellten Ergebnisse angenommen werden kann, liegen bei beiden Zuschlagarten auch die kleinsten Poren innerhalb des Erfassungsbereiches des Quecksilberporosimeters. Die auf das Probengewicht bezogenen Porenvolumina betragen zwischen 10 bis 20 % des erfaßbaren Porenvolumens von Zementstein. Die Bilder zeigen, daß das calcitische Material eine sehr gleichmäßige Häufigkeitsverteilung des Porenvolumens aufweist, wohingegen Teile des Kiessand-Materials auch sehr grobe Poren haben. Abgesehen von diesen hat das Kiessand-Material ebenso wie der verwendete Kalkstein offenbar einen hohen Dichtigkeitsgrad.

3.3.2.2. Matrixmörtel

Naturgemäß streuen die Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens der Matrixmörtel der beiden Betonarten mehr als die des reinen Zementsteines. Zur Untersuchung der Entwicklungstendenzen des Mörtels bei veränderlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen mußte daher eine möglichst große Zahl von Proben herangezogen werden. Obwohl die Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens in Bild A 17 des Anhangs aus jeweils 3 Einzelmessungen ermittelt wurden, lassen sich die an Zementstein nachweisbaren Entwicklungsvorgänge nur andeutungsweise erkennen. Darüber hinaus weisen jedoch die Mörtel Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens auf, die sich von denen des Zementsteins durch einen Volumenanteil im Bereich größerer Porenradien beachtlich unterscheiden. Form und Größenbereich ist außerdem für die beiden Matrixmörtelarten verschieden. Dies wird in Bild 46 unten erläutert, wo am Beispiel von 180 Tage alten Proben aus Fenster 8 eine schematische Aufteilung der Porenvolumina vorgenommen wird. Danach setzen sich die Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens zusammen aus:

- A - einem dem Zementstein zuzuschreibenden Volumenanteil im Bereich der kleinsten erfaßten Poren, und zwar für die calcitischen Mörtel mit Radien $< r_I \approx 40$ nm und für die Kiessand-Mörtel mit Radien $< r_I \approx 52$ nm. Das beachtlich größere gewichtsbezogene Porenvolumen des calcitischen Mörtels ist vor allem auch auf den höheren Zementstein-gehalt zurückzuführen,
- B - der Eigenporosität des Zuschlag, die in beiden Fällen von Poren mit Radien > 10 nm gebildet wird und nur geringen Anteil an der Gesamtporosität hat,

- C - der gefügebedingten Porosität, das ist das durch geometrische Anordnung, Kornform und Oberflächenbeschaffenheit von den Zuschlägen mittelbar hervorgerufene Porenvolumen, das bei den calcitischen Mörteln hauptsächlich Porenradien zwischen 40 und 500 nm umfaßt und im Falle der Kiessand-Mörtel dem Radienbereich zwischen 52 und etwa 1000 nm zuzuordnen ist. Die Abschätzung der gewichtsbezogenen Porenvolumina zeigt, daß diese gefügebedingte Porosität des calcitischen Mörtels etwa um 30 % größer sein dürfte als die der Kiessand-Mörtel.

Eine zahlenmäßige Aufteilung der gemessenen Porenvolumina nach Art des Bildes 46 kann selbstverständlich nur Anhaltswerte liefern.

Alle an den Matrixmörteln gemessenen Häufigkeitsverteilungen des Porenvolumens wurden mit der anhand von Bild 46 erläuterten Methode analysiert (vgl. Abschnitt 2.3.4.2). Dabei wurde

- 1) die Entwicklung der Zementsteinporosität (A) durch die Porenvolumina (u_I) sowie die zugehörigen zentralen Porenradien (r_{MI}) gekennzeichnet,
- 2) die Entwicklung der gefügebedingten Porosität (C) durch die Porenvolumina (u_{II}) sowie die zugehörigen zentralen Porenradien (r_{MII}) charakterisiert.

Da die Häufigkeitsverteilungen erwartungsgemäß stark streuten, war es notwendig, die Ergebnisse jeweils den beiden Zuschlagarten entsprechend zusammenzufassen.

Bild 51 rechts zeigt die Entwicklungstendenzen der gefügebedingten Porosität (Porenvolumina u_{II}) vor Heizbeginn. Die Entwicklungsbereiche der beiden Betonarten sind zwar unterschiedlich groß, weisen aber den gleichen abnehmenden Verlauf auf, d. h. in beiden Fällen wird der Porenraum kleiner. In Bild 51 links wird für den gleichen Zeitraum die Entwicklung der Zementsteinporosität (Porenvolumina u_I) verglichen. Das Porenvolumen erreicht zwar im Alter von 28 Tagen bei beiden Betonarten die gleiche Größenordnung, die Entwicklung ist jedoch in jungem Alter gegenläufig. Da sich die gefügebedingte Porosität in beiden Fällen gleichartig entwickelte, war dies zunächst nicht zu erklären und - da überdies sonst gleiche Bedingungen vorlagen - vermutlich auf das Ausdehnungsverhalten des calcitischen Zuschlages bei der Temperaturerhöhung nach dem Betonieren (Bild 9) zurückzuführen, die zur Rißbildung führte (vgl. Abschnitt 3.4.1). Es ist ferner zu berücksichtigen, daß in beiden Fällen auch eine unmittelbare Beeinflussung der Zementsteinporosität bei Temperaturen unterhalb von 60 °C nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Entwicklung der Zementsteinporosität nach Heizbeginn wird in den Bildern 48 und 49 anhand

der Änderungen der Porenvolumina (u_t) sowie der zentralen Porenradien (u_{MI}) dargestellt, wobei die Ergebnisse für jeweils zwei benachbarte Fenster ($\hat{=}$ verschiedene Temperaturbereiche) in einer Ausgleichskurve zusammengefaßt sind. Im Falle der Mörtel mit Kiessand-Zuschlägen (Bild 49) tritt eine geringfügige Verringerung der Porenvolumina (u_t) ein, die durch die Temperaturerhöhung offenbar nur wenig beeinflusst wird. Außerdem werden die Porenvolumina nach Heizbeginn bis zum Alter von etwa 100 bis 150 Tagen je nach Lage im Balken zu kleineren zentralen Porenradien (u_{MI}) hin verschoben. Dies trifft für die Betone mit den calcitischen Zuschlägen nicht zu (Bild 48), vielmehr nimmt hier die Zementsteinporosität insbesondere bei höheren Temperaturen zunächst stark zu und fällt anschließend langsam ab. Auch die in Bild 48 oben dargestellten zentralen Porenradien (r_{MI}) werden nach Heizbeginn zunächst größer und fallen dann ab. Es ist jedoch bemerkenswert, daß sich bei den Porenradien für den niedrigsten Temperaturbereich (Fenster 7/8) die größte Verschiebung ergibt. Insgesamt zeigen sowohl die Porenvolumina als auch die zugehörigen zentralen Porenradien bis zum Alter von 471 Tagen eine leicht abnehmende Tendenz.

Beim Vergleich der Diagramme der Bilder 48 und 49 entsteht der Eindruck, als wenn im Falle der calcitischen Betone die Entwicklung der Zementsteinporosität von einer offenbar temperaturabhängigen Zunahme des Porenvolumens überlagert wäre. Bild 50 zeigt, daß die gefügebundene Porosität bei beiden Betonen nach Heizbeginn nur noch unbedeutende Veränderungen erfährt und die Entwicklung der Zementsteinporosität kaum unterschiedlich beeinträchtigt haben kann. Da bei beiden Betonen auch nach Heizbeginn die gleichen Entwicklungsbedingungen vorlagen, ist auch hier (wie bei der Entwicklung vor Heizbeginn) die Ursache vermutlich in der Rißbildung infolge unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens von Zuschlag und Zementstein zu suchen (vgl. Abschnitt 3.4.1).

Nimmt man an, daß das Kiessand-Material die Vorgänge im Porenraum und den Entwicklungsprozeß des Zementsteins nur in geringem Umfang beeinflusst habe, dann läßt Bild 49 weitere Aufschlüsse zu. Im Bereich der heißen Seite (Kurven 1/2 und 3/4 des oberen Diagrammes) verläuft die Verschiebung der Zementsteinporosität zu kleineren zentralen Porenradien hin innerhalb der Aufheizphase besonders heftig, klingt aber nach Erreichen des geradlinigen Temperaturverlaufs bald ab. Dagegen vollzieht sich die Entwicklung in dem von der Temperaturerhöhung nur wenig betroffenen Bereich der Balken (Kurve 7/8 des oberen Diagrammes) langsamer, kommt aber erst in wesentlich höherem Alter zum Stillstand. Dabei werden insgesamt kleinere zentrale Porenradien erhalten als im Falle der Kurve 1/2. Vom Entwicklungs-

verlauf der Porenvolumina (Bild 49, unteres Diagramm) werden diese Vorgänge bestätigt. Kurve 7/8 erreicht das niedrigste Porenvolumen, d.h. die Zahl der kleinen Poren hat im kühleren Bereich der Balken am meisten zugenommen.

3.3.3. Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Porenstrukturuntersuchungen können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

Porenvolumen

- Die Gesamtporosität (U_t) von Zementstein (gelagert in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung) wächst mit steigendem W/Z-Wert. Mit fortschreitendem Alter wird die Gesamtporosität geringer. Bei höheren W/Z-Werten ($> 0,4$) kommt die Entwicklung früher zum Stillstand als bei niedrigen.
- Die Gesamtporosität (U_t) der Matrixmörtel aus calcitischem und Kiessand-Beton ist erheblich geringer als die von Zementstein entsprechenden W/Z-Wertes. Die Verringerung der Gesamtporosität innerhalb der ersten 28 Tage ist der des Zementsteins analog.
- Bei beiden Mörtelarten wird die altersbedingte Abnahme der Gesamtporosität (U_t) durch die mit der Beheizung verbundenen Temperaturerhöhungen beeinflusst. Die Gesamtporosität im Bereich erhöhter Temperaturen nimmt zunächst um etwa 5 bis 10 % zu und wird mit fortschreitendem Alter wieder geringer. Bei den calcitischen Mörteln ist außerdem eine Zunahme der Gesamtporosität festzustellen, deren Ursache in der Bildung von Rissen infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnung von Zuschlag und Zementstein zu suchen sein dürfte.
- Das mit dem Quecksilberporosimeter erfaßte Porenvolumen (U_{Hg}) der Matrixmörtel ist umso größer, je höher der W/Z-Wert ist. Bis zum 28. Tag nimmt es bei allen Mörteln in gleicher Weise ab. Die altersbedingte Verringerung des Porenvolumens wird durch die Beheizung unterbrochen. Die im Zuge der Temperaturerhöhung stattfindende Vergrößerung des Porenvolumens im Bereich der beheizten Stirnseiten ist beim calcitischen Matrixmörtel besonders ausgeprägt. Mit fortschreitendem Alter nehmen die Porenvolumina dann wieder ab.

Porengrößenverteilung

- Die mit dem Quecksilberporosimeter an Zementstein (gelagert in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung) gemessenen Porengrößenverteilungen zeigen, daß mit steigendem W/Z-

Wert vor allem das Volumen der großen Poren zunimmt; ferner, daß sich auch in hohem Alter das Porenvolumen noch zu kleineren Porengrößen hin verschiebt; daraus kann gefolgert werden, daß die Zahl der kleinen Poren mit fortschreitender Hydratation anwächst, d. h. der Gelporenraum wird auf Kosten des Kapillarporenraumes vergrößert.

- Die verwendeten Zuschläge haben sehr gleichmäßige Porengrößenverteilungen. Der Anteil der Zuschläge am Gesamtporenvolumen ist jedoch in beiden Fällen vergleichsweise gering.
- Neben der mit dem Quecksilberporosimeter erfaßbaren Zementsteinporosität sowie der Eigenporosität der Zuschläge weisen die Porengrößenverteilungen der Matrixmörtel Porenvolumenanteile auf, deren Entstehung mittelbar von den Zuschlägen abhängt. Bei den calcitischen Matrixmörteln liegt diese "gefügebedingte Porosität" im Porenradialbereich zwischen ca. 40 und 500 nm, bei den Matrixmörteln aus den Kiessand-Betonen ist dieser Bereich größer, und zwar ca. 52 bis 1000 nm.
- Vor Heizbeginn nimmt die gefügebedingte Porosität beider Mörtel in jungem Alter stark ab. Die Zementsteinporosität der beiden Mörtel entwickelt sich im gleichen Zeitraum (bis zum 28. Tag) gegenläufig. Sie wird für die Kiessand-Mörtel größer, während sie für die calcitischen Mörtel abnimmt. Es wird vermutet, daß im Falle der calcitischen Mörtel der Entwicklungsverlauf von temperaturabhängigen Verformungen überlagert ist, die durch das Verhalten der Zuschläge verursacht werden.
- Nach Heizbeginn ist die gefügebedingte Porosität keinen wesentlichen Veränderungen mehr unterworfen. Dagegen wird die Entwicklung der Zementsteinporosität durch die Temperaturerhöhung beeinflusst. Hierdurch werden aber auch die Hydratationsvorgänge beschleunigt. Die dabei entstehenden Poren scheinen größer zu sein als bei normalen Erhärtungstemperaturen. Im Falle der calcitischen Mörtel ist zu vermuten, daß die Entwicklung im Bereich der Zementsteinporosität durch temperaturbedingte Rißbildung zwischen Zuschlag und Zementstein überlagert wird.

Auch die in jüngerer Zeit veröffentlichten Arbeiten über die Entwicklung der Porenstruktur von Zementstein haben die Vorstellungen von Powers im wesentlichen bestätigen können (vgl. Abschnitt 1.1). So zeigen Winslow und Diamond (20), daß die Gesamtporosität unter normalen Erhärtungsbedingungen mit dem Alter abnimmt, während der Gelporenraum infolge wachsender Zahl der Gelporen größer wird. Von

Auskeren und Horn (90) wird bestätigt, daß mit steigendem W/Z-Wert das Überschußwasser die Vergrößerung des Kapillarporenraumes bewirkt. Der Gelporenraum scheint

davon weitgehend unberührt zu bleiben. Die vom W/Z-Wert abhängigen Veränderungen der Porenstruktur sind weitaus bedeutsamer als die durch Hydratation bedingten Entwicklungsvorgänge (20). Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse stehen im Einklang mit diesen grundlegenden Erkenntnissen.

Mit zunehmender Temperatur vergrößern sich die Hydratationsprodukte. Erst in jüngster Zeit sind Arbeiten zur Frage des Einflusses der Temperatur auf die Porenstruktur vorgelegt worden. Bei Untersuchungen von hydratisiertem Tricalciumsilicat haben Skalny und Odler (115) mit Hilfe von Sorptionsmessungen festgestellt, daß bei niedrigem Alter durch Temperaturerhöhung die Entwicklung des Gehaltes an nicht verdampfbarrem Wasser sowie der spezifischen Oberfläche anfangs beschleunigt werden konnte. Anschließend sank die Hydratationsrate bei Temperaturen von 75 und 100 °C sehr schnell, und die Reaktionen kamen schon vor dem 28. Tag zum Stillstand. Bei etwa 25 °C hydratisierte Proben wiesen schließlich eine geringere Gesamtporosität bei größerer spezifischer Oberfläche auf. Sellevold (91) beobachtete an Zementstein, der bei Raumtemperatur in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung gelagert und nachträglich auf 97 °C erhitzt wurde, den gleichen Effekt, nämlich daß - bedingt durch die Temperaturbehandlung - die spezifische Oberfläche kleiner und die Poren gröber wurden. Diamond (114) fand, daß anfängliche Entwicklungsunterschiede bei Hydratationstemperaturen zwischen 6 und 40 °C innerhalb der nachfolgenden Zeit ausgeglichen werden. Daraus kann man schließen, daß erst bei Temperaturen oberhalb von etwa 40 °C mit merklichen Veränderungen der Porenstruktur zu rechnen ist.

Durch die Temperaturerhöhung wird nicht nur die Reaktionsgeschwindigkeit vergrößert, sondern auch die durch Partialdampfdruck und Temperatur beschriebenen Existenzbedingungen der Hydratationsprodukte beeinflusst, was zu Neubildungen und zu Anpassungen bestehender Phasen an die veränderten Gleichgewichtsbedingungen führt. Da alle diese Reaktionen in irgendeiner Weise von Einfluß auf den Wärmestrom im Balken sind, geben die Wärmestromdichten des Bildes 14 und die errechneten Werte der Wärmeleitfähigkeit in Bild 60 Auskunft über den zeitlichen Ablauf der durch die Beheizung der Balken eingeleiteten Strukturänderungen im Zementstein. Dabei zeigt sich, daß - ähnlich wie bei der Entwicklung der zentralen Porenradialen nach Bild 49 - die Vorgänge im Bereich der hohen Temperaturen schon im Alter von etwa 90 Tagen zum Abschluß kommen, während dies bei niedrigen Temperaturen länger dauert.

Die Permeabilität von Beton mit dichtem Gefüge ist in der Regel wesentlich größer als die von reifem Zementstein (11). Die Gasdurchlässigkeit von Zementstein und von Zementmörtel

hängt z. B. nicht nur vom Verdichtungsgrad und vom W/Z-Wert ab, sondern wird auch durch die Nachbehandlung beeinflusst (24, 116), so daß bei längerer Wasserlagerung mit einer Verminderung der Durchlässigkeit zu rechnen ist. Dies ist ein Anhaltspunkt dafür, daß sich die Porenraumanteile ihrer Herkunft nach unterscheiden lassen müssen (Zementsteinporosität, Eigenporosität der Zuschläge, gefügebedingte Porosität). Nach C z e r n i n (117) können überdies Fehler im Verbund von Zuschlag und Zementstein selbst bei sorgfältigen Laborversuchen nicht immer vollständig vermieden werden. Dabei hängt das Auftreten kapillarer Hohlräume von der Art der Zuschläge ab, Kalksteinzuschlag scheint einen besseren Verbund zu gewährleisten als quarzhaltiges Material.

Hinsichtlich der gefügebedingten Porosität sind die Porengrößenverteilungen der Matrixmörtel mit calcitischem bzw. Kiessand-Zuschlag erwartungsgemäß deutlich voneinander verschieden. Auch die Beobachtungen von K r o o n e und C r o o k (118), wonach in Zementmörtel niedrigen Alters durch Nachbehandlung bei 100 % rel. Feuchte die Poren mit Radien > 200 nm kleiner wurden, während das Volumen der kleinen Poren ("Zementsteinporosität") zunahm, wird von der Entwicklung der Matrixmörtel mit Kiessand-Zuschlag bis zum Heizbeginn zumindest qualitativ bestätigt. Die gleichen Autoren fanden bei Untersuchungen an Zementmörteln verschiedenen Sandgehaltes und W/Z-Wertes (119), daß durch Erhöhung des Sandgehaltes die Porenquerschnitte unregelmäßiger wurden, was z. B. auch zur Erklärung der unterschiedlich großen Porositätsanteile beitragen mag. Für die aufgrund der eigenen Untersuchungen getroffene Annahme, daß die Zementsteinporosität der calcitischen Matrixmörtel durch Rißbildung infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnung von Zementstein und Zuschlag (vgl. den nachfolgenden Abschnitt 3.4.1) erhöht wird, konnte im Schrifttum keine Parallele gefunden werden.

3.4. Entwicklung der technologischen Eigenschaften

3.4.1. Schrumpfen, Schwinden und thermische Ausdehnung

In Abschnitt 2.5.2. werden die an den Balken gemessenen Längenänderungen anhand des Bildes 58 wiedergegebenen Entwicklungsschemas erläutert.

Im Hinblick auf die vor Heizbeginn am 28. Tag verbliebenen Verkürzungen infolge Schrumpfens und Schwindens (Δl [5^*]), die aus den in Bild 34 dargestellten Messungen abgeleitet wurden, ist zu berücksichtigen, daß vor allem die unmittelbar nach dem Betonieren auftretenden Volumenänderungen versuchsstechnisch nur schwer zu erfassen sind. Die üblicherweise zur Kennzeichnung des Reifegrades im Volumenome-

ter gemessene Kontraktion von Zementstein infolge Schrumpfens, die vom W/Z-Wert abhängt, fällt bei normalen Betonen praktisch nicht ins Gewicht. Dieser Vorgang kann bei den hier infrage stehenden W/Z-Werten im Alter von 28 Tagen als weitgehend abgeschlossen angesehen werden (120). Für beide Betonarten wurde ein Wert von $100 \mu\text{m/m}$ ($\hat{=} 240 \mu\text{m}$ Längenänderung der Balken) ermittelt. DIN 1045 ((1), Tabelle 12) gibt für Lagerung in sehr feuchter Luft Endschwindmaße gleicher Größenordnung an.

Im Vergleich zu der verbliebenen Längenänderung vor Heizbeginn ist die zuvor (im Alter von 24 Stunden) durch Hydratationswärme verursachte entgegengesetzt wirkende thermische Ausdehnung dem Betrage nach wesentlich größer und wird bei den calcitischen Betonen etwa $450 \mu\text{m}$ und bei den Kiessand Betonen etwa $750 \mu\text{m}$ betragen haben. Während bei diesen mit einem annähernd gleichartigen thermischen Ausdehnungsverhalten der einzelnen Bestandteile zu rechnen ist, kann das für die calcitischen Betone nicht angenommen werden. Nach Abschnitt 2.4.1.2 beträgt der thermische Ausdehnungskoeffizient des calcitischen Zuschlages etwa $4,7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, der des Kiessand-Zuschlages etwa $11,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, und für den Zementstein ist nach D e t t l i n g (54) ein Wert zwischen $10,0$ und $23,0 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ anzusetzen. Die bei der Temperaturerhöhung auf ca. 60°C vom Kalkstein behinderte Ausdehnung des Zementsteines führt zu Zugspannungen vor allem im Bereich der Verbundzonen, die nach C z e r n i n (117) von vornherein Fehlstellen aufweisen. Trotz hoher Festigkeiten im Alter von 24 Stunden (nach Bild 55 beträgt die Biegezugfestigkeit von Mörtelprismen dann etwa $2/3$ der Endfestigkeit) bilden sich offenbar Entlastungsrisse. Es wurde vermutet, daß der gegenläufige Entwicklungsverlauf der Zementsteinporosität (Bild 51, Porenvolumen u_f) auf derartige Vorgänge zurückzuführen ist (Abschnitt 3.3.2.2). Möglicherweise ist mit einer "Ausheilung" der Risse zu rechnen, wenn sich auch in ihnen Hydratationsprodukte bilden. Dies könnte aus dem weiteren Entwicklungsverlauf der Zementsteinporosität bis zum 28. Tage gefolgert werden (Bild 51 links).

B r o w n e und B l u n d e l l (121) berichten im Zusammenhang mit Festigkeitsverlusten bei der Temperaturbehandlung von Betonen mit unterschiedlichen Grobzuschlägen, daß aufgrund der "thermischen Unverträglichkeit" von Kalkstein und Zementstein mit Spannungen zu rechnen ist. Die Autoren zeigen anhand von eigenen und fremden Untersuchungsergebnissen, daß gerade in jungem Alter die Temperaturerhöhung infolge Hydratationswärme bei Kalksteinbeton zu hohen Festigkeitseinbußen führt. W i s c h e r s (122) hat den Einfluß von Temperaturänderungen auf die Festigkeitseigenschaften von fünf Monate alten, unter Wasser erhärteten Zementmörteln untersucht und für Tempera-

turerhöhungen bis 60 °C keine Beeinträchtigung der Festigkeit aufgrund verschiedener thermischer Ausdehnungskoeffizienten festgestellt, obwohl Berechnungen auf elastizitätstheoretischer Grundlage erwarten ließen, daß vor allem die Biegezugfestigkeit stark beeinflußt würde.

Im Bereich der geschlossenen Stirnseiten der Balken werden nach Heizbeginn Temperaturerhöhungen bis maximal 60 °C erreicht. Im Falle der calcitischen Betone ist in diesen Bereichen mit nunmehr noch höheren Gefügespannungen zu rechnen, wobei sich erschwerend der infolge geringeren Feuchtigkeitsgehaltes größer anzusetzende thermische Ausdehnungskoeffizient des Zementsteins bemerkbar machen dürfte. Die aufgrund des Eigenspannungszustandes in den bereits vorgeschädigten Verbundzonen entstehenden Entlastungsrisse verursachen eine beachtliche Zunahme der Zementsteinporosität (Porenvolumen u_1 in Bild 48), ein Vorgang, der bei den Matrixmörteln aus Kiessand-Beton nicht zu beobachten war (vgl. Abschnitt 3.3.2).

Nach Heizbeginn liefert die thermische Ausdehnung den Hauptbeitrag zur Gesamtlängenänderung der Balken (vgl. Abschnitt 2.5.3). Bild 52 zeigt, daß die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Betone erwartungsgemäß im wesentlichen von der Art der Zuschläge abhängen. Neben dem vom Zuschlag bedingten Unterschied ist bei allen Betonen der Ausdehnungskoeffizient im "feuchten Zustand" (mit dem nicht verbrauchten Überschußwasser) etwa um $1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ höher als im "trockenen Zustand". Dies entspricht den in Abschnitt 1.2.3 erläuterten Zusammenhängen, wonach mit abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt der Anteil der "scheinbaren Wärmedehnung" zunächst größer wird. Dieser Anteil erreicht bei Gleichgewichtsfeuchten zwischen 70 und 45 % ein Maximum und ist bei beiden Betonarten nach D e t t l i n g (123) mit etwa $2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ anzusetzen; er wird mit fortschreitendem Reifen des Betons geringer. Unter Berücksichtigung der im trockenen Zustand gemessenen "wahren Wärmedehnung" (Bild 52) ergeben sich für den Zeitraum von etwa 1 1/2 Jahren nach Heizbeginn je nach Feuchtigkeitsgehalt der hier untersuchten Betone mittlere thermische Ausdehnungskoeffizienten von:

calcitische Betone $\alpha = (4,7 \text{ bis } 6,7) \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 Kiessand-Betone $\alpha = (10,1 \text{ bis } 12,1) \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Die Messungen der lokalen Längenänderungen in den Betonbalken nach Heizbeginn konnten in die vorliegende Arbeit noch nicht einbezogen werden (vgl. Abschnitt 2.2.4.2), so daß die infolge der thermisch-hygrischen Vorgänge im Beton auftretenden Dehnungen nur anhand der Gesamtlängenänderungen sowie der in Bild 53 dargestellten Endschwindmaße diskutiert wurden (Abschnitt 2.5.3). Die durch Trocknung bei 105 °C ermittelten Endschwindmaße von 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ für die

calcitischen Betone und von 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ für die Kiessand-Betone sind sicherlich größer als die nach vieljähriger Beheizung mit 80 °C im Bereich der heißen Stirnseiten zu erwartenden Werte. Die Empfehlung, für die Innenseite nach Heizbeginn über einen Bereich von 30 bis 50 cm ein Schwindmaß von 300 bis 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ anzunehmen (41), ist offenbar realistisch und gewährleistet ausreichende Sicherheit. Im Falle der calcitischen Betone genügen ca. 200 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Der Einfluß des W/Z-Wertes auf die Gesamtlängenänderungen der 2,40 m langen Balken nach Heizbeginn ist den Bildern 31 und 32 zu entnehmen. Bei einer Längung der calcitischen Balken in der Größenordnung von 400 μm ist der Wert für Balken 3 (W/Z = 0,50) gegenüber Balken 1 (W/Z = 0,50) um etwa 100 μm größer. Beim Kiessand-Beton mit Längungen in der Größenordnung von 750 μm unterscheiden sich die Werte für Balken 6 (W/Z = 0,63) und Balken 4 (W/Z = 0,52) um rd. 200 μm . Dem Entwicklungsverlauf der Gesamtlängenänderungen ist auch zu entnehmen, daß die nur sehr langsam auftretenden Veränderungen der Porenstruktur - von den Aufheizphasen abgesehen - offenbar keinen drastischen Einfluß auf das Schwindverhalten der Betone haben.

3.4.2. Druckfestigkeit

Die Festigkeitsentwicklung der Mörtelprismen (Bild 55, Abschnitt 2.4.2) entspricht den an einen Zement PZ 450 F nach DIN 1164 (3) zu stellenden Erwartungen. Im Alter von einem Tage (extrapolierte Werte) hat die Biegezugfestigkeit etwa 60 % und die Druckfestigkeit etwa 30 % der Werte im Alter von etwa 2 Jahren erreicht. Während die Druckfestigkeit nach 28 Tagen noch um etwa 20 % zunimmt, zeigt die mit den Gefügespannungen enger verknüpfte Biegezugfestigkeit oberhalb dieses Alters keinen nennenswerten Zuwachs mehr.

Die an Betonwürfeln ermittelte altersabhängige Druckfestigkeitszunahme (vgl. Bild 56, Abschnitt 2.4.2) läßt deutliche, von der Art der Lagerung und vom W/Z-Wert bestimmte Unterschiede erkennen. Bei dauernder "Feuchtlagerung" zeigen alle Betone die zu erwartende logarithmische Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Alter (124). Bei der im Alter von 7 Tagen begonnenen "Trockenlagerung" ergibt sich zunächst ein scheinbarer Festigkeitszuwachs, der auf Spannungsumlagerungen infolge Abgabe von Feuchtigkeit aus dem Porenraum zurückzuführen ist. Bei diesen Trocknungsvorgängen wird der für die Hydratation notwendige Feuchtigkeitsgehalt im Beton unterschritten (vgl. Abschnitt 1.1.4), und die Festigkeitsentwicklung kommt zum Stillstand. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse sowie der an Bohrkernen aus abgespaltenen Abschnitten der Balken 3 und 6 festgestellten Druckfestigkeiten (vgl. Bild 38, Abschnitt 2.2.5) ist die Entwicklung der Druckfestigkeit des Betons in den Bal-

ken folgendermaßen gekennzeichnet:

In den Temperaturbereichen bis etwa 50 °C ist eine temperaturabhängige Beeinflussung nicht wahrzunehmen. Die Entwicklung der Druckfestigkeit im Bereich der freien Stirnseite wird durch die Trocknungsvorgänge nur unwesentlich beeinträchtigt.

Während der Kiessand-Beton bei Temperaturen oberhalb von ca. 50 °C eine deutliche Festigkeitszunahme (maximal ca. 15 %) gegenüber der kühleren Balkenzone aufweist, ist dies beim calcitischen Beton nicht festzustellen. Vielmehr nimmt hier die Druckfestigkeit mit steigender Temperatur ab (maximal ca. 30 %).

Die Festigkeitszunahme des Kiessand-Betons ist durch eine temperaturabhängige Beschleunigung der Hydratationsvorgänge im Zementstein bei ausreichendem Feuchtigkeitsgehalt verursacht (vgl. (125) und (126)). Dieser festigkeitsfördernde Einfluß wird beim calcitischen Beton durch die festigkeitsmindernden Vorgänge der Rißbildung infolge des erheblichen Unterschiedes der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kalkstein und Zementstein zunichte gemacht (vgl. Abschnitt 3.4.1). Bild 59 ist zu entnehmen, daß der durch den Temperaturzyklus infolge Hydratationswärme bereits vorgeschädigte Beton infolge einer Temperaturbehandlung bei 70 °C eine Druckfestigkeitseinbuße von ca. 10 % erfährt. *Brown* und *Blundell* berichten von Versuchen, bei denen durch Temperaturerhöhung in der gleichen Größenordnung (53 °C) sogar Festigkeitseinbußen von 35 % festgestellt wurden (121).

3.4.3. Wärmeleitfähigkeit

Die für die calcitischen und die Kiessand-Betone zu erwartende Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt bei Temperaturen zwischen 20 und 80 °C ist in Bild 61 dargestellt. Dem Schema liegen die von *Krischer* (59) erläuterten Gesetzmäßigkeiten zugrunde, wonach nicht nur das Feststoffgerüst und der mit Wasser und Luft gefüllte Porenraum Wärme leiten, sondern auch Dampfdiffusionsvorgänge zum Wärmetransport beitragen. In welchem Maße dies geschieht, ist vom Feuchtigkeitsgehalt und von der Temperatur abhängig. Unter Berücksichtigung von Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur können aufgrund eigener Untersuchungsergebnisse (Bild 61) folgende Bereiche für die Wärmeleitfähigkeit angegeben werden:

calcitischer Beton $1,4 < \lambda < ca. 2,8$ [W / m·K]

$$\rho_f \approx 2,3 \text{ kg/dm}^3$$

Kiessand-Beton $1,8 < \lambda < ca. 3,5$ [W / m·K]

$$\rho_f \approx 2,2 \text{ kg/dm}^3$$

Die Abhängigkeit vom W/Z-Wert ist innerhalb des untersuchten Bereiches offenbar nur unbedeutend (vgl. auch Bild A 39 im Anhang). Während für die Wärmeleitfähigkeit der Betone im trockenen Zustand Bezugswerte im Schrifttum vorhanden sind (41), fehlen vergleichbare Angaben über den Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes. Lediglich *Maréchal* (62) gibt für nicht näher spezifizierte Kiessand-Betone Abhängigkeiten an, wonach beim Feuchtigkeitsgleichgewicht zum jeweiligen Sättigungsdampfdruck bei Temperaturen um 60 °C mit einem Maximum der Wärmeleitfähigkeit (2,4 bis 3,3 W/m·K) zu rechnen ist.

4. Zusammenfassung

Die während des Betriebes in dickwandigen Beton-Reaktorbehältern entstehenden Temperaturen verändern nicht nur den thermisch-hygrischen Gleichgewichtszustand im Beton, sondern beeinflussen auch seine technologischen Eigenschaften. In der vorliegenden Arbeit wurde die Wärme- und Feuchtigkeitsleitung und die damit verbundenen Entwicklungsvorgänge und Veränderungen im Beton untersucht.

Als Probekörper dienten 6 Betonbalken (vgl. Bild 3) mit den Abmessungen von 40 cm x 40 cm x 240 cm, die im Alter von 28 Tagen an einer Stirnseite entschalt und auf der gegenüber liegenden Stirnseite beheizt wurden. Die Solltemperatur an der beheizten Stirnseite betrug 80 °C; an der freien Stirnseite herrschte ein Klima von 20 °C und 45 % rel. Feuchte. Um zu bewirken, daß Wärme und Feuchtigkeit nur in Richtung der Balkenlängsachse befördert wurden, war die Versuchsanordnung mit Dampfsperren, Wärmedämmschichten und Kompensationsheizbändern ausgestattet. In Hohlräumen auf der Oberseite der Balken verteilt befanden sich Probekörper aus sogenanntem Matrixmörtel in unmittelbarem Kontakt mit dem Beton, die in verschiedenen Zeitabständen für Gefügeuntersuchungen entnommen wurden. Es wurden 3 Betone mit gebrochenem calcitischem Zuschlag mit Wasser/Zement-Werten von 0,50; 0,565 und 0,63 sowie 3 Betone mit ungebrochenem Rhein-Kiessand-Zuschlag mit W/Z-Werten von 0,52; 0,575 und 0,63 hergestellt. Als Bindemittel war ein Portlandzement PZ 450 F zu verwenden. Für ergänzende Untersuchungen dienten Probekörper aus Zementstein, Zementmörtel sowie den verschiedenen Betonen des Versuchsprogramms. Die vorliegende Arbeit enthält die Messungen bis zum Alter von jeweils etwa 450 Tagen. Zur Erfassung des Wassergehaltes - mit verdampfbarem und nicht verdampfbarem Anteil - wurden elektrische Widerstandselemente und eine Neutronensonde einge-

setzt. Daneben fanden gebräuchliche gravimetrische Methoden Verwendung. Zur Kennzeichnung der Veränderungen des Porenraumes wurde ein Quecksilberporosimeter sowie andere Geräte verwendet.

Infolge Hydratationswärme erreichte die Temperatur in allen Balken innerhalb von 24 Stunden nach dem Betonieren maximale Werte von etwa 60 °C. Trotz einer verhältnismäßig niedrigen Hydratationswärme von nur 273 J/g hat sich im Falle der calcitischen Betone die Verwendung des Zementes mit hoher Anfangsfestigkeit als nachteilig erwiesen.

Nach Heizbeginn stellte sich innerhalb von etwa 30 Tagen in allen Balken eine annähernd geradlinige Temperaturverteilung in Längsrichtung ein. Allerdings kann erst anhand der gemessenen Wärmestromdichten der zeitliche Ablauf der thermischen Vorgänge unterschieden werden. Nach etwa 110-tägiger Beheizung sind die Temperaturfelder schließlich als frei von Wärmesenken und -quellen anzusehen. Die nach Heizbeginn einsetzende Feuchtigkeitsbewegung wird mit Hilfe von Feuchtigkeitsverlustkurven und Bilanzen des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter sowie durch die Entwicklung des örtlichen Trocknungsverlaufes gekennzeichnet. Dabei zeigt sich, daß die "großräumige" Feuchtigkeitsleitung anfangs vermutlich von örtlichen Schwankungen des Gehaltes an verdampfbarem Wasser überlagert wird. Der Trocknungsverlauf an der freien Stirnseite entspricht zunächst den bekannten Gesetzmäßigkeiten der Trocknung kapillar-hygroskopischer Stoffe und ist dabei im wesentlichen von den konstanten Umgebungsbedingungen abhängig. Für die Trocknung bei Temperatureinwirkung wird unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Daten ein Schema entworfen, das den zeitlichen Ablauf in Abhängigkeit von der Temperatur (\pm Abstand von der beheizten Stirnseite), dem Gehalt an verdampfbarem Wasser und der Porenstruktur zum Ausdruck bringt.

Die thermisch-hygrischen Vorgänge beeinflussen die Porenstruktur. Die altersbedingte Verringerung der Gesamtporosität wird nach Heizbeginn unterbrochen; je nach der örtlichen Temperaturerhöhung steigt die Gesamtporosität zunächst an und nimmt später wieder ab. Im Gegensatz zu den Matrixmörteln der Kiessand-Betone, bei denen die Gesamtporosität schließlich auf 15 % absinkt, ist bei den äquivalenten calcitischen Mörteln mit von vornherein höheren Gesamtporositäten ein beachtlicher "bleibender" Zuwachs festzustellen; es werden im Laufe von mehr als einem Jahr Gesamtporositäten von etwa 19 % erreicht. Auch die mit dem Quecksilberporosimeter erfaßten Porengrößenverteilungen zeigen spezifische Unterschiede. Während die Anteile der Eigenporosität der Zuschläge sowie der Zementsteinporosität zu den Porengrößenverteilungen beider Betonarten jeweils gleichartige Bei-

träge liefern, kann andererseits eine von der Art des Zuschlages abhängige "gefügebedingte Porosität" nachgewiesen werden. Diese umfaßt bei den calcitischen Mörteln das Porenvolumen innerhalb des Radienbereiches zwischen ca. 40 und 500 nm und bei den Mörteln der Kiessand-Betone zwischen ca. 52 und 1000 nm. Vor Heizbeginn nimmt die gefügebedingte Porosität beider Betonarten stark ab und die Temperaturerhöhung infolge Beheizung führt nur zu unwesentlichen Veränderungen. Die Entwicklung der Zementsteinporosität (Porenvolumina innerhalb der Radienbereiche zwischen ca. 4 und 40 bzw. 52 nm) der Matrixmörtel der Kiessand-Betone ist bis zum Heizbeginn durch ein Anwachsen des Porenvolumens gekennzeichnet. Nach Heizbeginn werden die Hydratationsvorgänge in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperaturerhöhung zwar beschleunigt, es bilden sich aber bei höheren Temperaturen (> 40 °C) gröbere Poren als bei normalen Erhärtungsbedingungen. Diese Entwicklung wird bei den calcitischen Mörteln offenbar durch Ribildung in den Verbundzonen zwischen Zuschlag und Zementstein überlagert, und zwar sowohl bei der Temperaturerhöhung infolge Hydratationswärme als auch infolge Beheizung. Derartige Vorgänge sind auf die Unterschiede der thermischen Ausdehnungskoeffizienten des calcitischen Zuschlages und des Zementsteins zurückzuführen. Bereits bei der Temperaturerhöhung infolge Hydratationswärme scheinen hohe Gefügespannungen zu Verformungen zu führen, die bei erneuter Temperaturerhöhung als Fehlstellen in Erscheinung treten. Dies führt auch zu bemerkenswerten Einbußen der Druckfestigkeit im Temperaturbereich des Balkens oberhalb von etwa 50 °C, die maximal 30 % der Druckfestigkeit des kühleren Bereiches ausmachen. Im Gegensatz dazu erreicht der Kiessand-Beton im gleichen Temperaturbereich Festigkeitszunahmen bis maximal 15 %.

Die an den Balken gemessenen Gesamtlängenänderungen setzen sich aus Anteilen zusammen, die auf die Einflüsse des Schrumpfens, des Schwindens und der thermischen Ausdehnung zurückzuführen sind. Diese wurden ergänzend an Probekörpern untersucht. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist je nach Feuchtigkeitsgehalt bei den calcitischen Betonen mit (4,7 bis 6,7) 10^{-6} / °C und bei den Kiessand-Betonen mit (10,1 bis 12,1) 10^{-6} / °C anzusetzen. Im Bereich der beheizten Stirnseiten (80 °C) ist mit Schwindmaßen zu rechnen, die im Falle der calcitischen Betone nicht mehr als ca. 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ und im Falle der Kiessand-Betone nicht mehr als ca. 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ betragen, vollständige Austrocknung vorausgesetzt.

Die Wärmeleitfähigkeit der Betone ist in erheblichem Maße vom Feuchtigkeitsgehalt und von der Temperatur abhängig. Für den Bereich der Gehalte an verdampfbarem Wasser bis etwa 12 Vol.-% ist bei den calcitischen Betonen mit Wer-

ten zwischen 1,4 und ca. 2,8 W/m·K und für die Kiessand-Betone zwischen 1,8 und ca. 3,5 W/m·K zu rechnen.

Im Gegensatz zu der weit verbreiteten Meinung zeigen die Ergebnisse, daß die Veränderungen des thermisch-hygrischen Gleichgewichtes mit der Gefügeentwicklung auch die technologischen Eigenschaften im untersuchten Temperaturbereich wesentlich mitbestimmen können. Da in diesem

Zusammenhang der Untersuchung des Trocknungsablaufes besondere Bedeutung zukommt, ist beabsichtigt, die Messungen an den noch im Versuch stehenden Balken bis zum Alter von 3 Jahren fortzusetzen, um anhand der Feuchtigkeitsverlustkurven der Balken sowie des örtlichen Trocknungsverlaufes die experimentellen Grundlagen für die Überprüfung thermisch-hygrischer Modelle zu erarbeiten.

SCHRIFTTUM

- (1) DIN 1045: Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung. Ausgabe Januar 1972.
- (2) DIN 1048 Bl. 1: Prüfverfahren für Beton; Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper. Ausgabe Januar 1972.
- (3) DIN 1164: Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement. Ausgabe Juni 1970.
 - Bl. 1: Begriffe, Bestandteile, Anforderungen, Lieferung.
 - Bl. 3: Bestimmung der Zusammensetzung.
 - Bl. 4: Bestimmung der Mahlfeinheit.
 - Bl. 5: Bestimmung der Erstarrungszeiten mit dem Nadelgerät.
 - Bl. 6: Bestimmung der Raumbeständigkeit mit dem Kochversuch.
 - Bl. 7: Bestimmung der Festigkeit.
 - Bl. 8: Bestimmung der Hydratationswärme mit dem Lösungskalorimeter.
- (4) DIN 4188 Bl. 1: Siebböden; Drahtsiebböden für Prüfsiebe; Maße. Ausgabe April 1969.
- (5) DIN 52 102: Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Dichte; Rohdichte, Reindichte, Dichtigkeitsgrad, Gesamtporosität. Ausgabe September 1965.
- (6) DIN 52 103: Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Wasseraufnahme. Ausgabe November 1972.
- (7) DIN 52 612: Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät; Wärmeleitfähigkeit für die Anwendung im Bauwesen.
- (8) Goffin, H.: Spannbeton-Reaktordruckbehälter, Übersicht deutscher Forschungsarbeiten. Beton 10 (1974), S. 378-384.
- (9) Kühl, H.: Zement-Chemie. Bd. III, 3. Aufl., Berlin: VEB Verlag Technik 1961, S. 170-171.
- (10) Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. 2. erweit. Aufl., Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH 1964, S. 39-126.
- (11) Brunauer, S.: The structure of hardened Portland cement paste and concrete. Proc. 8th Conf. Silicate Ind. (SILICONF) 1965, Budapest: Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences 1966, S. 205-230.
- (12) Richartz, W.; Locher, F.W.: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilicathydraten und zum Gefüge des Zementsteins. Zement-Kalk-Gips 18 (1965), H. 9, S. 449-459.
- (13) Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. Betontechn. Berichte 1961, hrsg. v. K. Walz, Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH 1962, S. 199-213.
- (14) Powers, T.C.; Brownyard, T.L.: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. PCA Bull. 22 (1948), S. 472 ff.
- (15) Czernin, W.: Die physikalische Beschaffenheit der Hydratationsprodukte. Zement und Beton (1959), Nr. 16, S. 10-15.
- (16) Diamond, S.; Dolch, W.L.: Generalized log-normal distribution of pore sizes in hydrated cement paste. J. Colloid Interface Sci. 38 (1972), S. 234-244.
- (17) Brunauer, S.; Emmett, P.H.; Teller, E.: Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Amer. Chem. Soc. 60 (1938). S. 309.
- (18) Romberg, H.: Einfluß der Zementart auf die Porengrößenverteilung im Zementstein. Tonind.-Ztg. 95 (1971), Nr. 4, S. 104-115.
- (19) Powers, T.C.: Einige physikalische Gesichtspunkte zur Hydratation von Portland-

- zement. Zement-Kalk-Gips 14 (1961), Nr. 3, S. 81-87.
- (20) Winslow, D.N.; Diamond, S.: A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in Portland-cement. *J. Mater.* 5(1970), Nr. 3, S. 564-585.
- (21) Eipeltauer, E.; Schilcher, W.; Czernin, W.: Zur Frage der Porenverteilung in Zementhydratationsprodukten. *Zement-Kalk-Gips* 17 (1964), H. 12, S. 543-546.
- (22) a. a. O. (10), S. 59-60.
- (23) RILEM Technical Committee 15-PM: Determination of pore properties of constructional and other materials. *Matér. Constr.* 6 (1973), Nr. 33, S. 167-250.
- (24) Schwiete, H.E.; Ludwig, U.: Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. *Tonind.-Ztg.* 90 (1966), Nr. 12, S. 562-574.
- (25) Lehmann, H.; Roesky, W.: Festigkeitsentwicklung und Hydratation von Portland- und Hüttenzementen bei 20 °C, 5 °C und 1 °C. *Tonind.-Ztg.* 89 (1965), Nr. 15/16, S. 337-350.
- (26) Copeland, L.E.; Hayes, J.C.: Determination of non-evaporable water in hardened Portland-cement paste. *ASTM Bull.* 194 (1953), S. 70-74.
- (27) Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. *Trocknungstechnik*, Bd. 1, hrsg. v. O. Krischer und K. Kröll, Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1956, S. 52.
- (28) Kroone, B.; Blakey, F.A.: Reaction between carbon dioxide gas and mortar. *J. Amer. Concr. Inst.* 31 (1959), Nr. 1, S. 497-510.
- (29) Pihlajavaara, S.E.: On the main features and methods of investigation of drying and related phenomena in concrete. *Diss. Univ. Helsinki* 1965. The State Institute for Technical Research, Finland, Publ. Nr. 100, Helsinki: 1965, S. 65.
- (30) Klopfer, H.: *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH 1974, S. 20-23.
- (31) Altmann, K.: *Das Verhalten des Betons bei Einwirkung von Feuchtigkeit*. *Diss. Techn. Univ. Berlin* 1968 (D 83), S. 55-61.
- (32) Andreae, G.: Zur Feuchtemessung in Beton. *Materialprüf.* 15 (1973), Nr. 3, S. 95-97.
- (33) Hummel, A.: *Das Beton-ABC*. 12. Aufl., Berlin: Verlag v. Wilhelm Ernst & Sohn 1959, S. 86-97.
- (34) Pilny, F.: Die Bedeutung des Porenraumes im Beton. *Beton* 16 (1966), H. 4, S. 147-150.
- (35) Powers, T.C.: Grundlagen des Betonschwindens. *Betonstein-Ztg.* 27 (1961), H. 2, S. 45-51.
- (36) a. a. O. (10), S. 95-98.
- (37) Bažant, Z.P.: Thermodynamics of interacting continua with surfaces and creep analysis of concrete structures. *Nucl. Eng. Design* 20 (1972), S. 477-505.
- (38) Bažant, Z.P.; Hemann, J.H.; Koller, H.; Najjar, L.J.: A thin-wall cement paste cylinder for creep tests at variable humidity or temperature. *Matér. Constr.* 6 (1973), Nr. 34, S. 277-281.
- (39) Walz, K.; Wischers, G.: *Beton als Strahlenschutz für Kernreaktoren*. *Betontechn. Berichte* 1961, hrsg. v. K. Walz, Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH 1962, S. 91-127.
- (40) Jaeger, Th.: *Strahlenabschirmung durch Beton*. *Technischer Strahlenschutz*. München: Verlag Karl Thieme 1959, S. 16-115 (Buchreihe der Atomkernenergie, Bd. 2)
- (41) Eibl, J.; Waubke, N.V.; Klingsch, W.; Schneider, U.; Rieche, G.: Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im Reaktordruckbehälterbau. *Spannbeton-Reaktordruckbehälter*. Berlin: Verlag v. Wilhelm Ernst & Sohn 1974, S. 3-51 (Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 237).
- (42) a. a. O. (10), S. 99-103.
- (43) Wischers, G.: Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung. Hrsg. v. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH 1961, S. 11 (Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 28).
- (44) Browne, R.D.: Properties of concrete in reactor vessels. *Conf. on Prestressed Concrete Pressure Vessels*, Westminster 1967 (Group C., Pap. 13), London: The Institution of Civil Engineers 1968, S. 131-151.
- (45) Ross, A.D. et al.: Short- and long-term deformations of concrete as influenced by its physical structure and state. *Proc. Int. Conf. Structure of Concrete*, London: Cement and Concrete Association 1965.
- (46) Hornby, I.W.: Moisture Measurements in mass concrete. *Conf. on Prestressed Concrete Reactor Vessels and Their Thermal Insulation*, 18.-20. Nov. 1969, Großbritannien.
- (47) England, G.L.; Ross, A.D.: Shrinkage, moisture and pore pressures in hardened concrete. *Proc. Concrete Nucl. Reactors*, Berlin 1970, Detroit: American Concrete Institute 1972, S. 883-907 (ACI Spec. Publ. SP 34-42).

- (48) McDonald, J.E.: An experimental study of moisture migration in concrete. Proc. Concrete Nucl. Reactors, Berlin 1970, Detroit: American Concrete Institute 1972, S. 957-989 (ACI Spec. Publ. SP 34-45).
- (49) a. a. O. (30), S. 52-64.
- (50) Bažant, Z.P.: Constitutive equation for concrete creep and shrinkage based on thermodynamics of multiphase systems. Matér. Constr. 3 (1970), Nr. 13, S. 3-36.
- (51) Ross, A.D.; Parkinson, J.D.: Shrinkage in concrete pressure vessels. Nucl. Eng. Design 5 (1967), S. 150-160.
- (52) Westphal, W.: Physik, 20./21. Aufl., Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1959, S. 220-238.
- (53) Pilny, F.: Betondehnungen durch Feuchtigkeit. Zement u. Beton (1964), Nr. 30, S. 1-9.
- (54) Dettling, H.: Die Wärmedehnung des Zementsteins, der Gesteine und der Betone. Schriftenreihe des Otto-Graf-Instituts (1962), H. 3, 193 S..
- (55) Meyers, S.L.: Thermal expansion characteristics of hardened cement paste and of concrete. Proc. Highway Res. Board 30 (1950), S. 193-203.
- (56) a. a. O. (54), S. 159.
- (57) a. a. O. (54), S. 179.
- (58) a. a. O. (54), S. 148-153.
- (59) a. a. O. (27), S. 223-232.
- (60) Cammerer, W.F.: Der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung. Kältetechnik 13 (1961), H. 12, S. 413-420.
- (61) Missenard, A.: Recherches théoriques et expérimentales sur la conductivité thermique des bétons. Ann. Inst. Techn. Bât. Trav. Publ. 18 (1965), Nr. 211/212, S. 949-967.
- (62) Maréchal, J.C.: Thermal conductivity and thermal expansion coefficient of concrete as a function of temperature and humidity. Proc. Concrete Nucl. Reactors, Berlin 1970, Detroit: American Concrete Institute 1972, S. 1047-1057 (ACI Spec. Publ. SP 34-49).
- (63) Harmathy, T.Z.: Thermal properties of concrete at elevated temperatures. J. Mater. 5 (1970), Nr. 1, S. 47-74.
- (64) Mahlfeinheit von Zement; Richtlinien für die Bestimmung. Hrsg. v. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH 1967, S. 40-45 (Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 33).
- (65) Analysengang für Zemente. Hrsg. v. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH 1970, 111 S. (Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 37).
- (66) a. a. O. (29), S. 97-99.
- (67) a. a. O. (52), S. 270-272.
- (68) Gröber, H.; Erk, S.; Grigull, U.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Aufl., 3. Neudr., Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1963, S. 3-15.
- (69) Hundt, J.; Buschmann, J.: Moisture measurement in concrete. Matér. Constr. 4 (1971), Nr. 22, S. 253-259.
- (70) a. a. O. (31), S. 59-61.
- (71) Altmann, K.: Neues Feuchtigkeitsmeßverfahren für Bauteile. Bautechnik 47 (1970), Nr. 8, S. 268-272.
- (72) Altmann, K.: Das Verhalten von Schaumpolystyrolbeton (EPS-Beton) und seine Prüfung. Materialprüfung 16 (1974), Nr. 1, S. 3-6.
- (73) Altmann, K.: Die Feuchtigkeitsmessung in Bauteilen aus Mörtel und Beton. Habilitationsschrift, Fachber. Baukonstr., Techn. Univ. Berlin 1971 (D 83), S. 214.
- (74) Pohl, E.: Feuchtigkeitsmessung mit Neutronen. Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für Beton, 2. Aufl., Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1969, S. 167-176.
- (75) Neutron moisture gauges. Wien: International Atomic Energy Agency 1970, 95 S. (Technical Reports Series Nr. 112).
- (76) Trost, A.: Industrielle Feuchtemessung mit Neutronen. Z.f. Instrumentenkunde 73 (1965), H. 12.
- (77) Mlitz, P.; Neider, R.: Zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Baustoffen mit Hilfe von Neutronen. Bautechnik 44 (1967), H. 3, S. 77-81.
- (78) Trost, A.: Erfahrungen bei der Feuchtemessung mit Neutronen. Sprechsaal für Keramik, Glas, Email, Silikate 101 (1968), H. 17/18, S. 745-752.
- (79) Hönig, A. et al.: Comparison of commercial portable gauges for radiometric determination of building materials density and moisture. Confidential report. Brno Techn. Univ. 1969, VUT - 69 - D - 1, 194 S..
- (80) Ściesińska, E.: The accuracy of the neutron method of moisture measurement. Nukleonika 15 (1970), Nr. 9/10, S. 593-612.
- (81) Linder, A.: Statistische Methoden. Basel, Stuttgart: Birkhäuser Verlag 1964, 484 S..
- (82) Lichtner, B.; Hundt, J.: Porositätsmessungen an Zementmörtel und Beton. Tonind.-Ztg. 96 (1972), H. 8, S. 232-236.
- (83) Kühne, G.: Der Einfluß des Alters auf den Festporenraum des Betons. Baustoffindustrie 14 (1971), H. 11, S. 370-373.

- (84) Konopicky, K.; Tkotz, G.; Kowalczyk, F.: Ermittlung der Dichte mit Hilfe eines Luftvergleichspyknometers. *Tonind.-Ztg.* 89 (1965), Nr. 17/18, S. 402-405.
- (85) Ritter, H.L.; Drake, L.C.: Pore-size distribution in porous materials. *Ind. Eng. Chem., Anal. Ed.* 17 (1945), S. 782-791.
- (86) Guyer, A. jr.; Böhlen, B.; Guyer, A.: Über die Bestimmung von Porengrößen. *Helvetica chimica acta* 42 (1959), Nr. 6, S. 2103-2110.
- (87) Jüntgen, H.; Schwuger, M.: Aussagekraft der Quecksilber- porosimetrie bei der Charakterisierung poröser Stoffe. *Chemie-Ing.-Techn.* 38 (1966), H. 12, S. 1271-1278.
- (88) Alongi, V.: Bestimmung der Mikrostruktur poröser Feststoffe. *Chem. Rdsch.* 20 (1967), Nr. 49.
- (89) Hill, R.D.: A study of pore-size distribution of fired clay bodies, II. An improved method of interpreting mercury penetration data. *Trans. Brit. Ceram. Soc.* 59 (1960), S. 198-212.
- (90) Auskern, A.; Horn, W.: Capillary porosity in hardened cement paste. *J. Testing and Evaluation* 1 (1973), Nr. 1, S. 74-79.
- (91) Sellevold, E.J.: Mercury porosimetry of hardened cement paste cured or stored at 97 °C. *Cem. Concr. Res.* 4 (1974), S. 399-404.
- (92) Jung, M.: Die Porosität von Portlandzementstein. *Silikattechn.* 22 (1971), H. 7, S. 222-224.
- (93) Jahresbericht 1972 der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin, Berlin: 1973, S. 49.
- (94) Jespersen, H.B.: Die Wärmeleitahlen feuchter Stoffe und ihre Messung. *Ges.-Ing.* 74 (1953), S. 187-193.
- (95) a.a.O. (10), S. 101.
- (96) a.a.O. (10), S. 99.
- (97) a.a.O. (29), S. 97.
- (98) Pihlajavaara, S.E.; Ranta, M.A.: A theoretical study on the effect of gravitation on drying with special reference to concrete. Helsinki: 1965, 61 S. (The State Institute for Technical Research, Finland, Publ. Nr. 94).
- (99) Lykow, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Hrsg. v. K. Stefes, Berlin: Akademie-Verlag 1958, S. 17.
- (100) a.a.O. (9), S. 170.
- (101) a.a.O. (10), S. 47; 56.
- (102) a.a.O. (9), S. 120.
- (103) Ramachandran, V.S.: Applications of differential thermal analysis in cement chemistry. New York: Chemical Publishing Company Inc. 1969, S. 128-129.
- (104) Lea, F.M.: The chemistry of cement and concrete. 3rd Edition (1970), Glasgow: Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1970, S. 207.
- (105) a.a.O. (9), S. 28.
- (106) a.a.O. (10), S. 127.
- (107) a.a.O. (9), S. 181 ff.; S. 248 ff.
- (108) a.a.O. (104), S. 177 ff.
- (109) a.a.O. (10), S. 43.
- (110) a.a.O. (27), S. 233 ff.
- (111) a.a.O. (9), S. 249.
- (112) Yuan, R.L.; Hilsdorf, H.K.; Kesler, C.E.: Effect of temperature on the drying of concrete. Dept. Theor. Appl. Mechanics, Univ. of Illinois 1968, Rep. Nr. 316, 61 S..
- (113) a.a.O. (10), S. 56.
- (114) Diamond, S.: Pore structure of hardened cement paste as influenced by hydration temperature. Proc. Int. Symp. Pore Structure and Properties of Materials, September 18-21, 1973, in Prague, Preliminary Rep., Part I, hrsg. v. S. Modrý und Svatá, Prag: Academia 1973, S. B - 73 bis B - 88.
- (115) Skalny, J.; Odler, I.: Pore structure of hydrated calcium silicates. III. Influence of temperature on the pore structure of hydrated tricalcium silicate. *J. Colloid Interface Sci.* 40 (1972), Nr. 2, S. 199-205.
- (116) Riedel, W.; Göhring, C.: Porenverteilung in Zementsteinen und Permeabilitätsmessungen an Zementmörteln. *Wiss. Z. Hochsch. Arch. Bauwes. Weimar* 15 (1968), H. 6, S. 655-660.
- (117) a.a.O. (10), S. 105.
- (118) Kroone, B.; Crook, D.N.: Studies of pore size distribution in mortars. *Mag. Concr. Res.* 13 (1961), Nr. 39, S. 127-132.
- (119) Kroone, B.; Crook, D.N.: Further studies of pore size distribution in mortars. *Mag. Concr. Res.* 14 (1962), Nr. 40, S. 43-46.
- (120) a.a.O. (10), S. 77-88.
- (121) Browne, R.D.; Blundell, R.: Relevance of concrete property research to pressure vessel design. Proc. Concrete Nucl. Reactors, Berlin 1970, Detroit: American Concrete Institute 1972, S. 69-102 (ACI Spec. Publ. SP 34-5).
- (122) a.a.O. (43), S. 102-109.
- (123) a.a.O. (54), S. 172-178.
- (124) a.a.O. (33), S. 115-117.
- (125) a.a.O. (33), S. 113.
- (126) a.a.O. (9), S. 171.

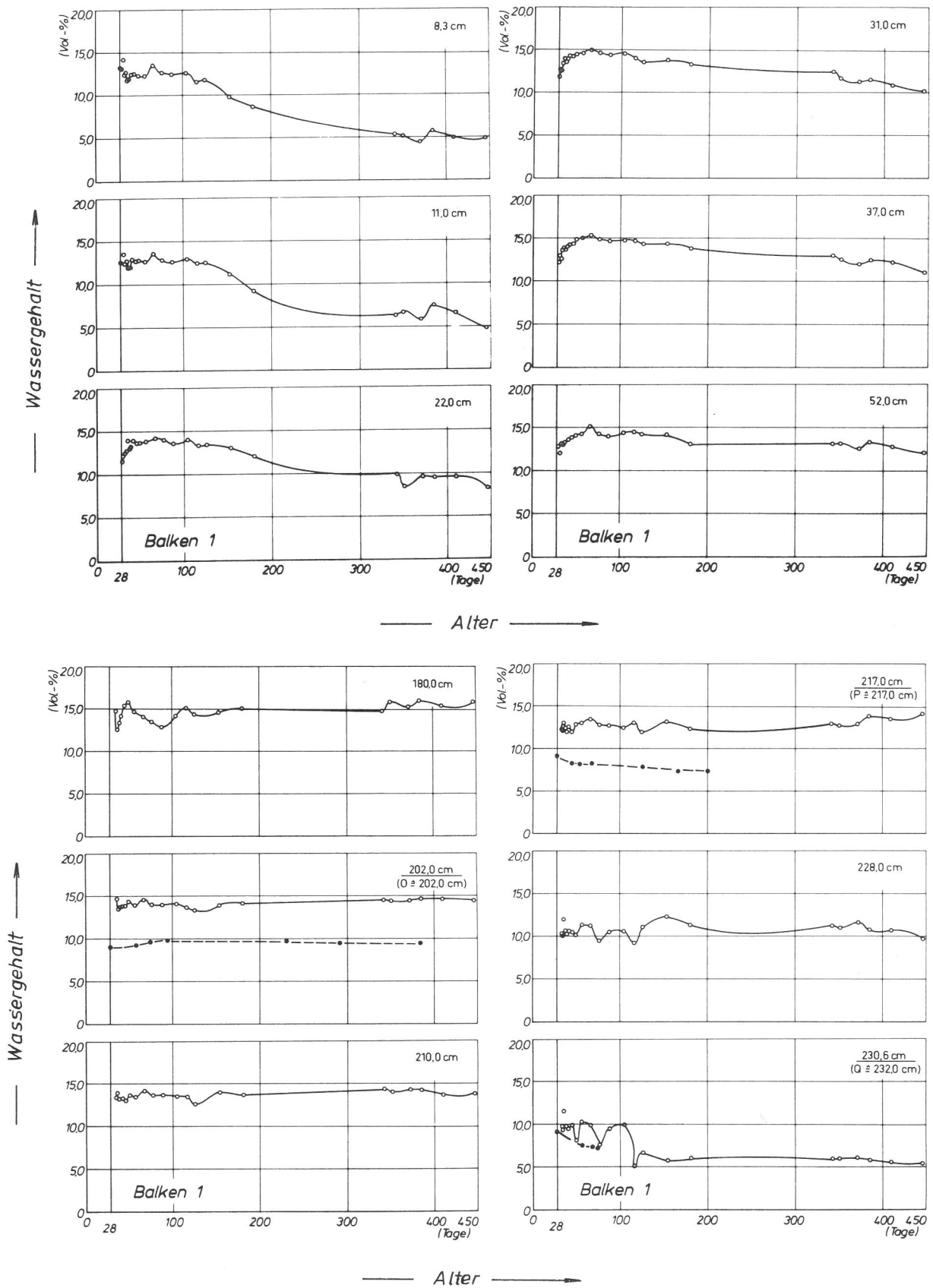


Bild A 1, A 2
 durchgezogene Kurven: Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter an Stellen verschiedenen Abstands von der beheizten Stirnseite (Ortskoordinate in cm); vgl. Abschn. 2.2.3.3.2

gestrichelte Kurven: Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Abhängigkeit vom Alter für die Meßebenen A bis Q (Angabe des Abstands von der beheizten Stirnseite in Klammern; vgl. Abschn. 2.2.3.2.2

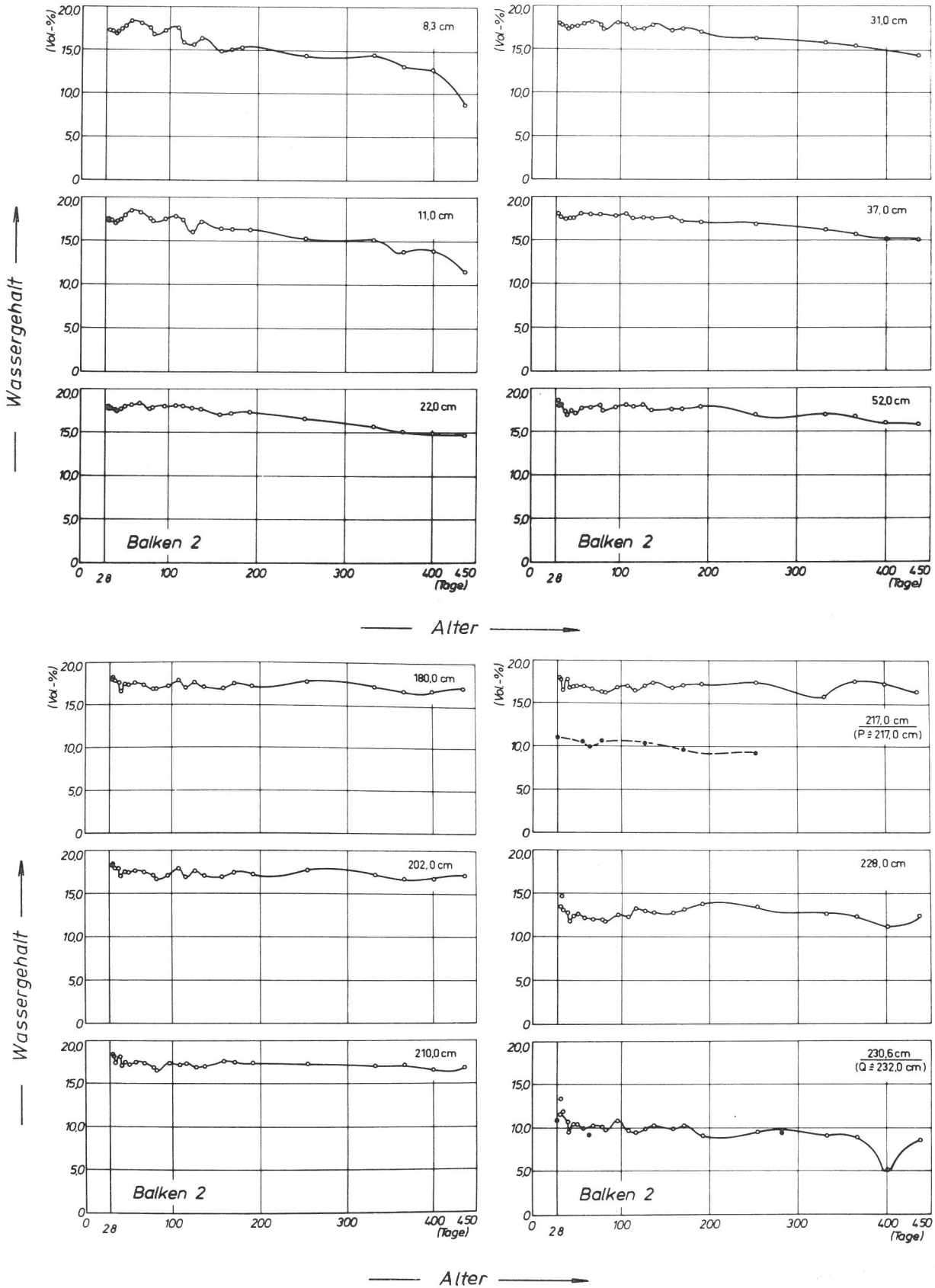


Bild A 3, A 4
 durchgezogene Kurven: Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter an Stellen verschiedenen Abstands von der beheizten Stirnseite (Ortskoordinate in cm); vgl. Abschn. 2.2.3.3.2

gestrichelte Kurven: Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Abhängigkeit vom Alter für die Meßebenen A bis Q (Angabe des Abstandes von der beheizten Stirnseite in Klammern); vgl. Abschn. 2.2.3.2.2

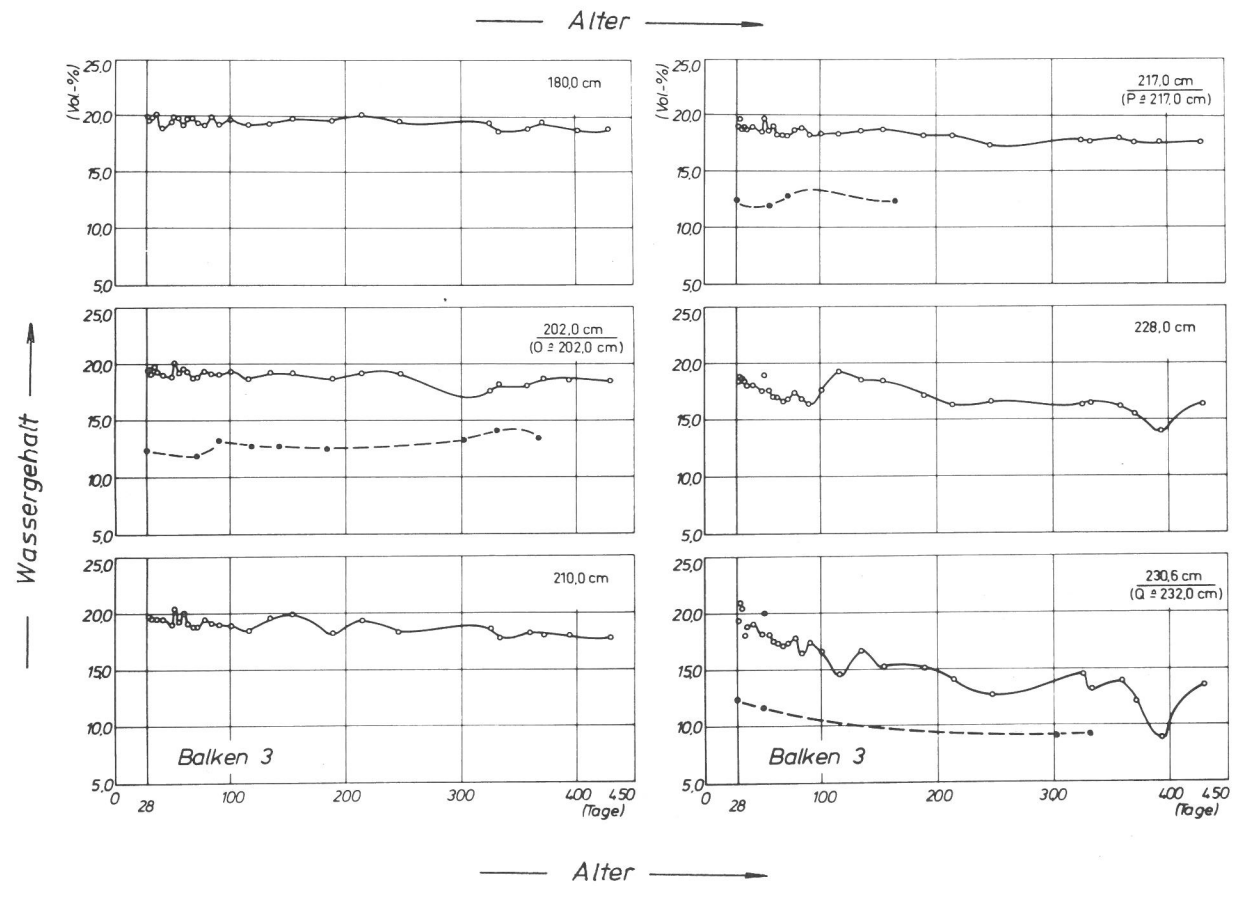
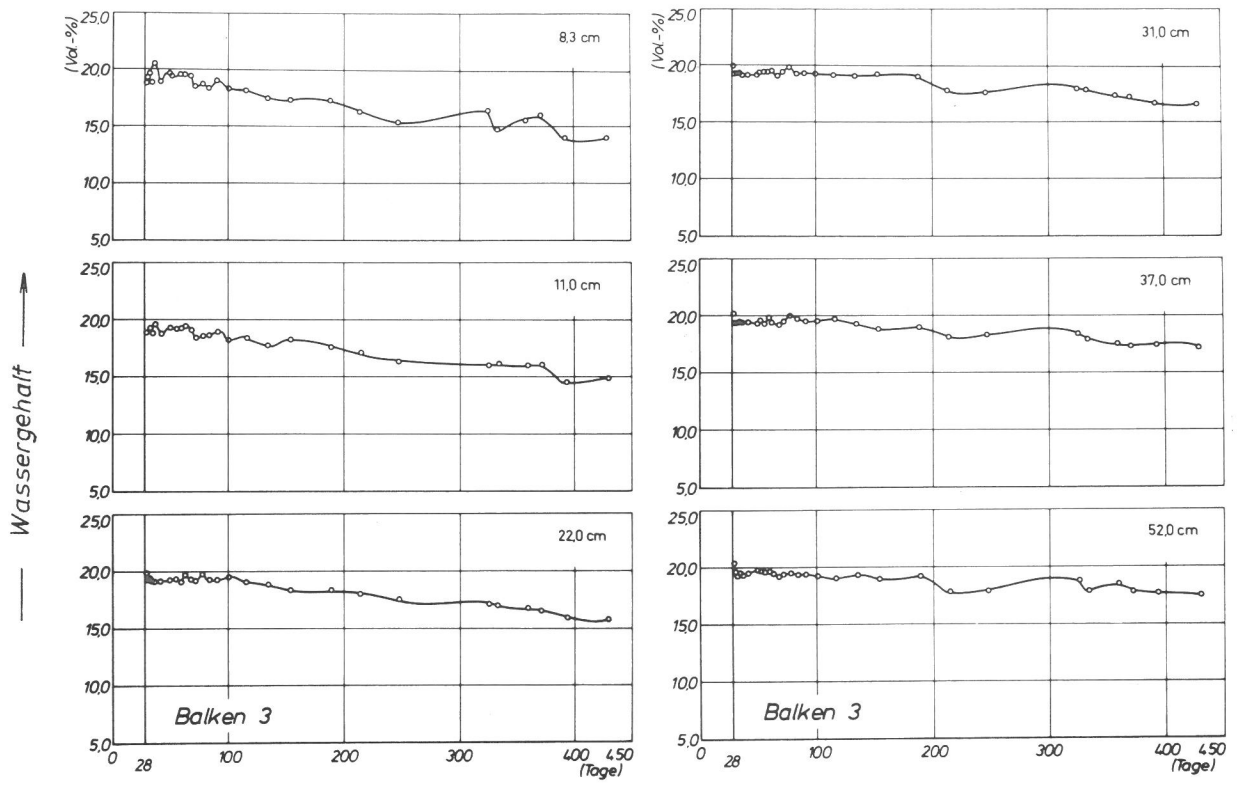


Bild A 5, A 6
 durchgezogene Kurven: Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter an Stellen verschiedenen Abstands von der beheizten Stirnseite (Ortskoordinate in cm); vgl. Abschn. 2.2.3.3.2

gestrichelte Kurven: Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Abhängigkeit vom Alter für die Meßebenen A bis Q (Angabe des Abstandes von der beheizten Stirnseite in Klammern); vgl. Abschn. 2.2.3.2.2

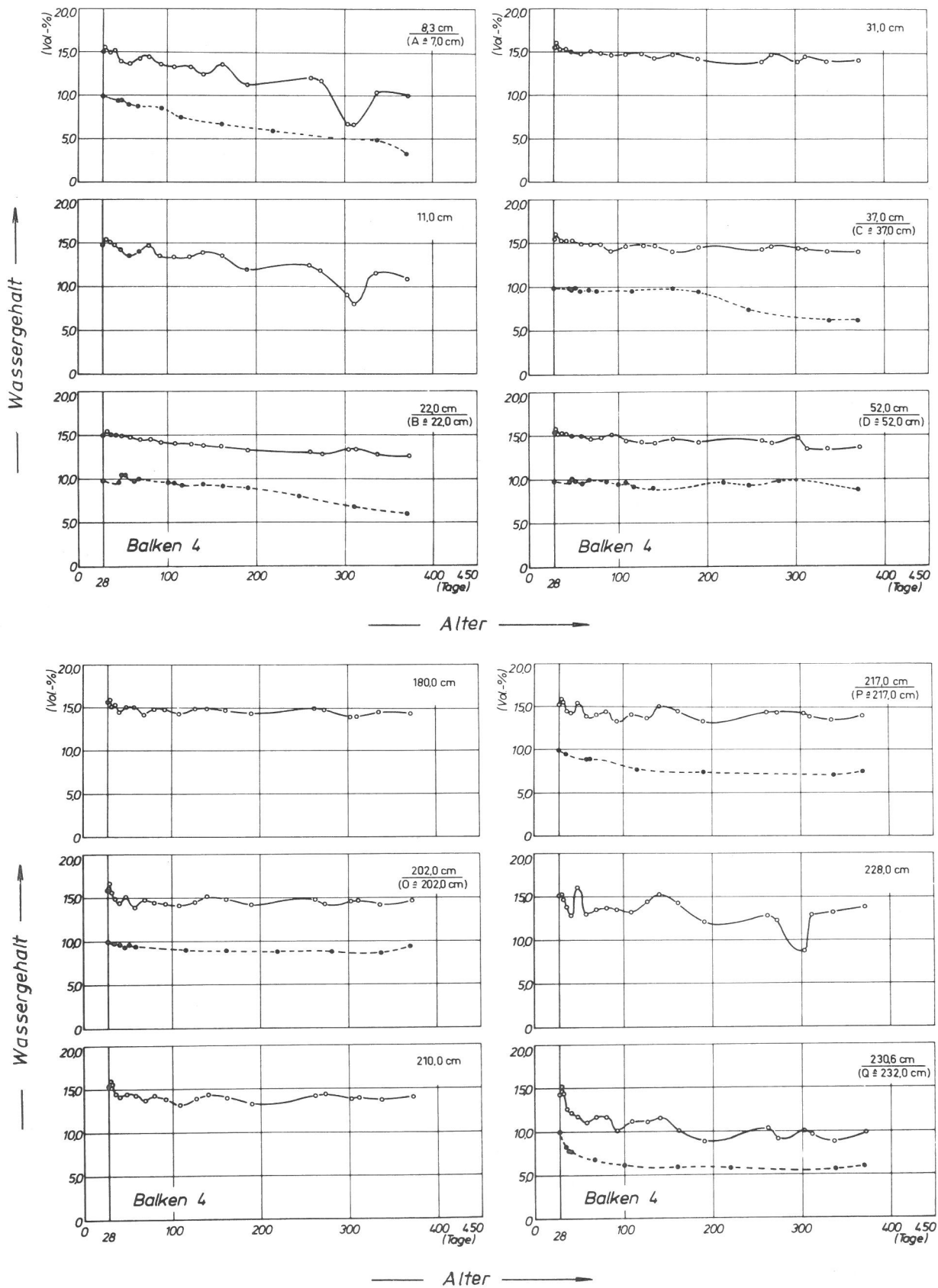


Bild A 7, A 8
 durchgezogene Kurven: Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter an Stellen verschiedenen Abstands von der beheizten Stirnseite (Ortskoordinaten in cm); vgl. Abschn. 2.2.3.3.2

gestrichelte Kurven: Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Abhängigkeit vom Alter für die Meßebenen A bis Q (Angabe des Abstandes von der beheizten Stirnseite in Klammern); vgl. Abschn. 2.2.3.2.2

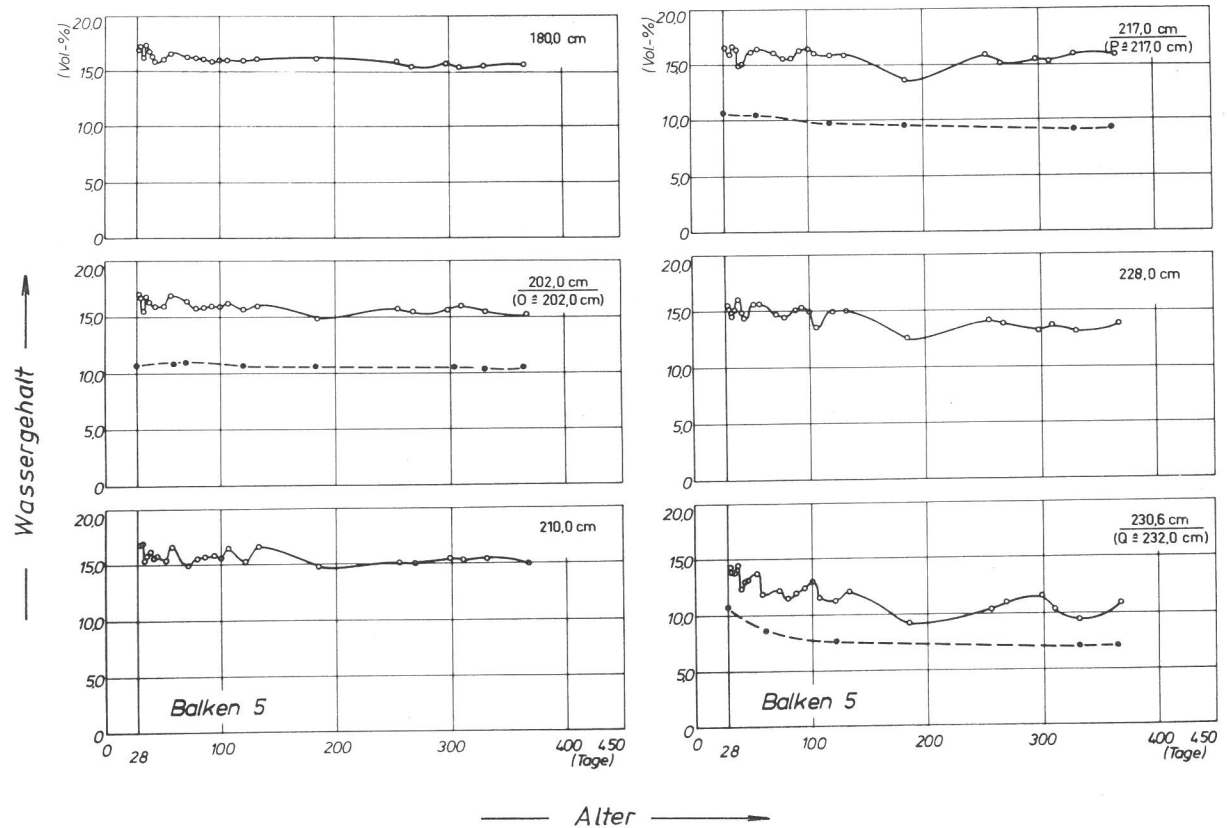
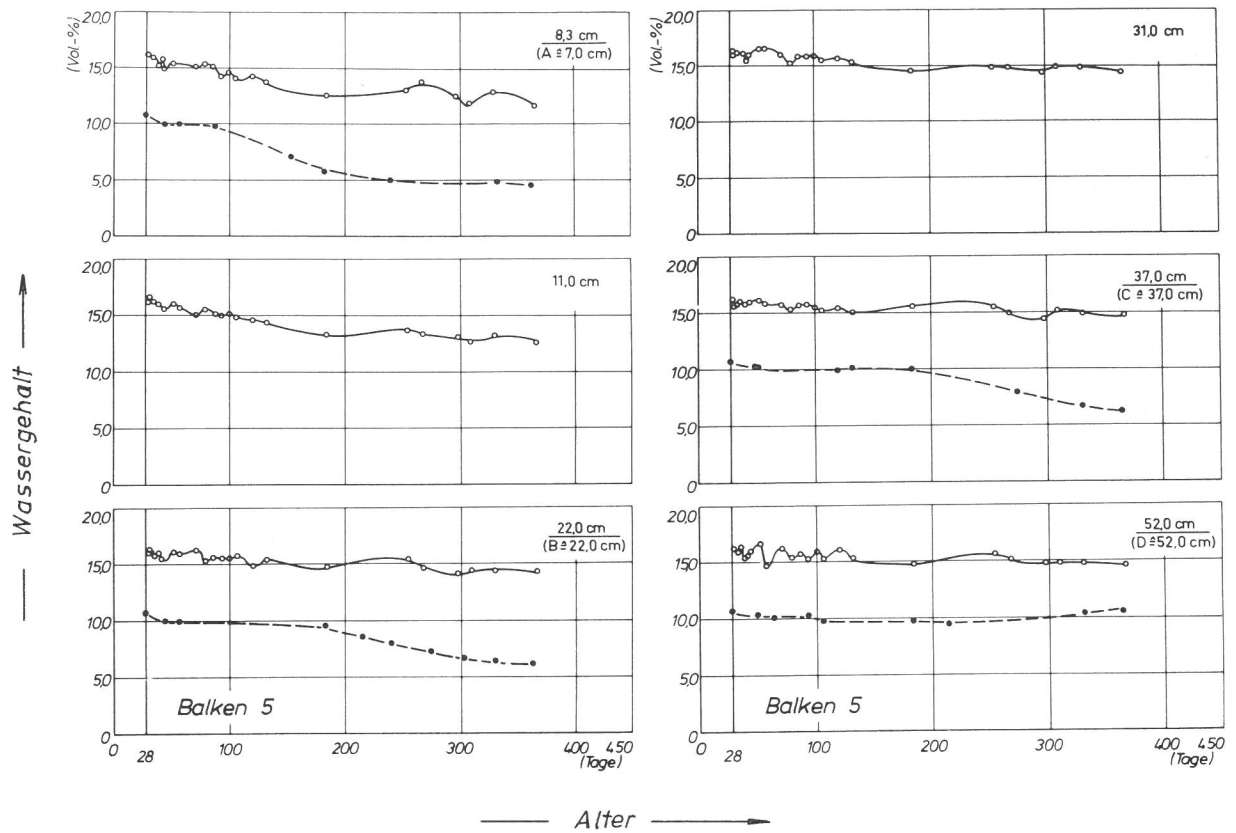


Bild A 9, A 10
 durchgezogene Kurven: Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter an Stellen verschiedenen Abstands von der beheizten Stirnseite (Ortskoordinate in cm); vgl. Abschn. 2.2.3.3.2

gestrichelte Kurven: Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Abhängigkeit vom Alter für die Meßebenen A bis Q (Angabe des Abstandes von der beheizten Stirnseite in Klammern); vgl. Abschn. 2.2.3.2.2

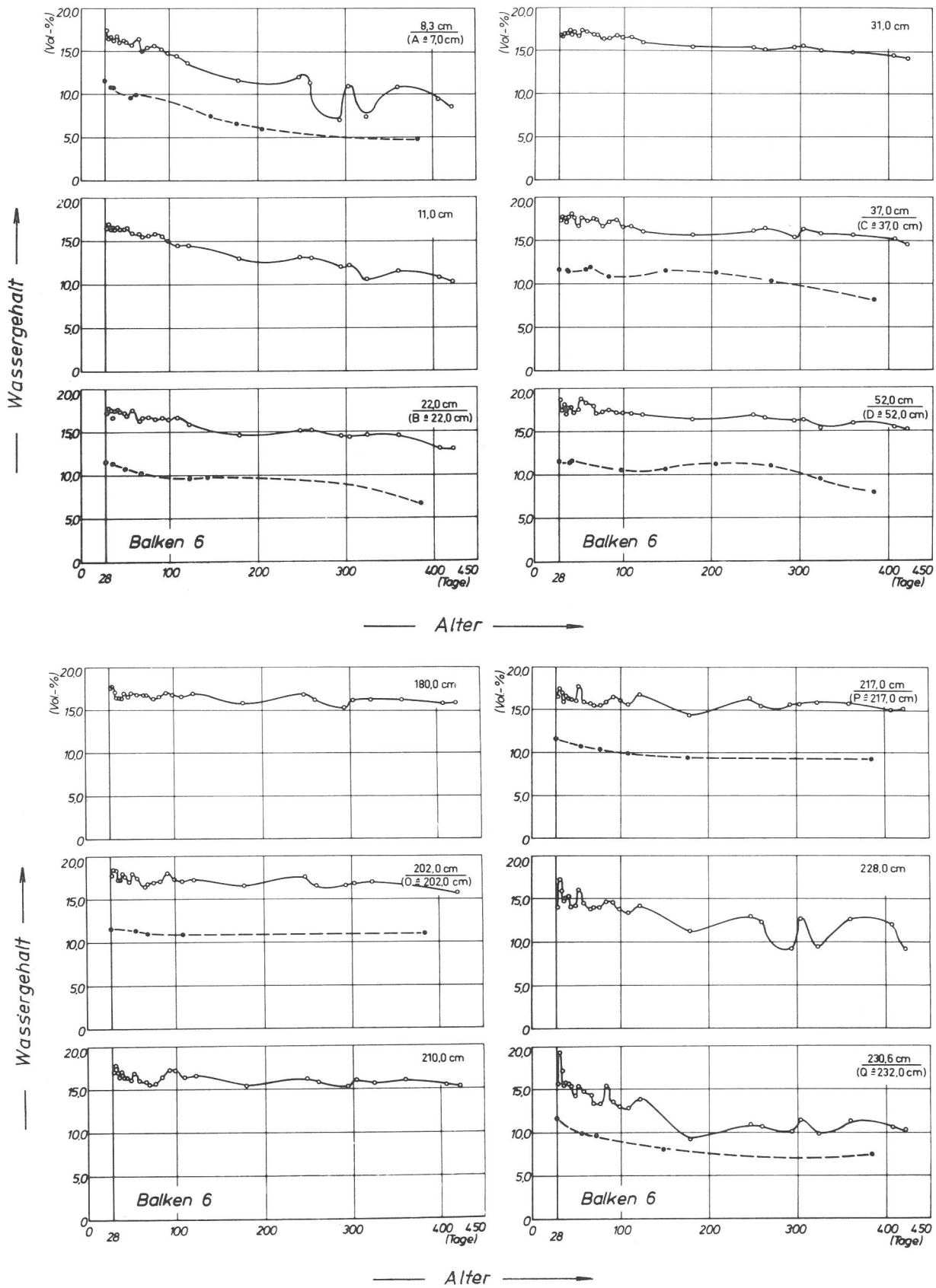


Bild A 11, Bild A 12
 durchgezogene Kurven: Entwicklung des Gesamtwassergehaltes in Abhängigkeit vom Alter an Stellen verschiedenen Abstands von der beheizten Stirnseite (Ortskoordinate in cm); vgl. Abschn. 2.2.3.3.2

gestrichelte Kurven: Entwicklung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser in Abhängigkeit vom Alter für die Meßebenen A bis Q (Angabe des Abstandes von der beheizten Stirnseite in Klammern); vgl. Abschn. 2.2.3.2.2

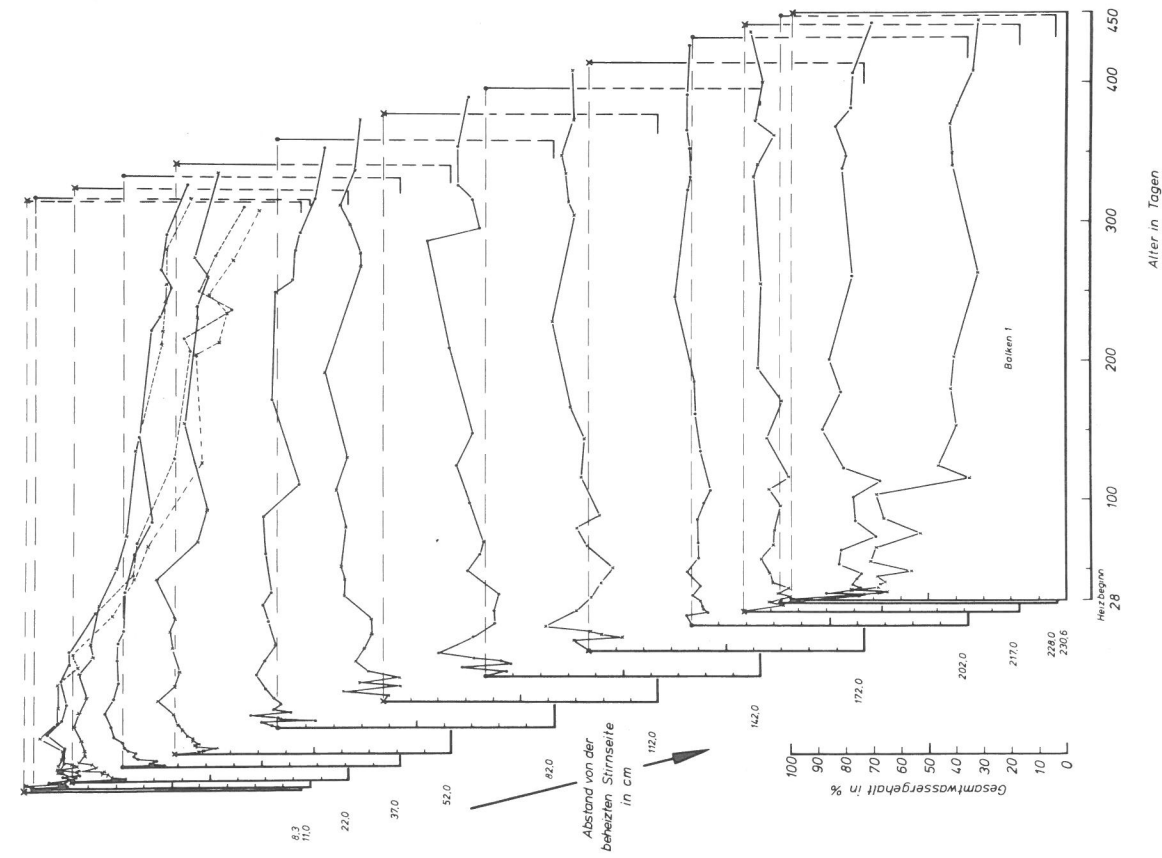


Bild A 13

Entwicklung des Gesamtwassergehaltes (in Prozent des Ausgangswertes vor Heizbeginn) in Abhängigkeit vom Betonalter; angetragen für 13 Ortskoordinaten (Abstand von der beheizten Stirnseite) des Balkens 1 (vgl. dazu Abschn. 2.2.3.3)

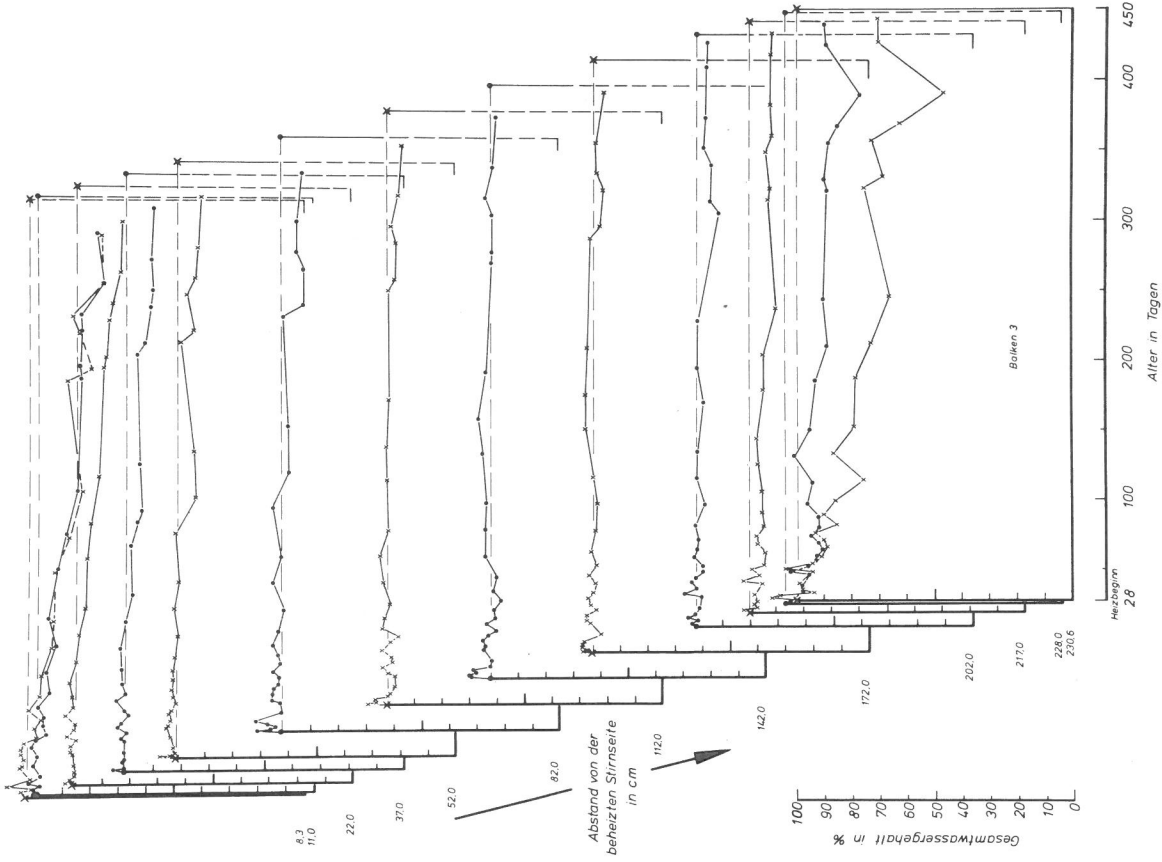


Bild A 14

Entwicklung des Gesamtwassergehaltes (in Prozent des Ausgangswertes vor Heizbeginn) in Abhängigkeit vom Betonalter; angetragen für 13 Ortskoordinaten (Abstand von der beheizten Stirnseite) des Balkens 3 (vgl. dazu Abschn. 2.2.3.3)

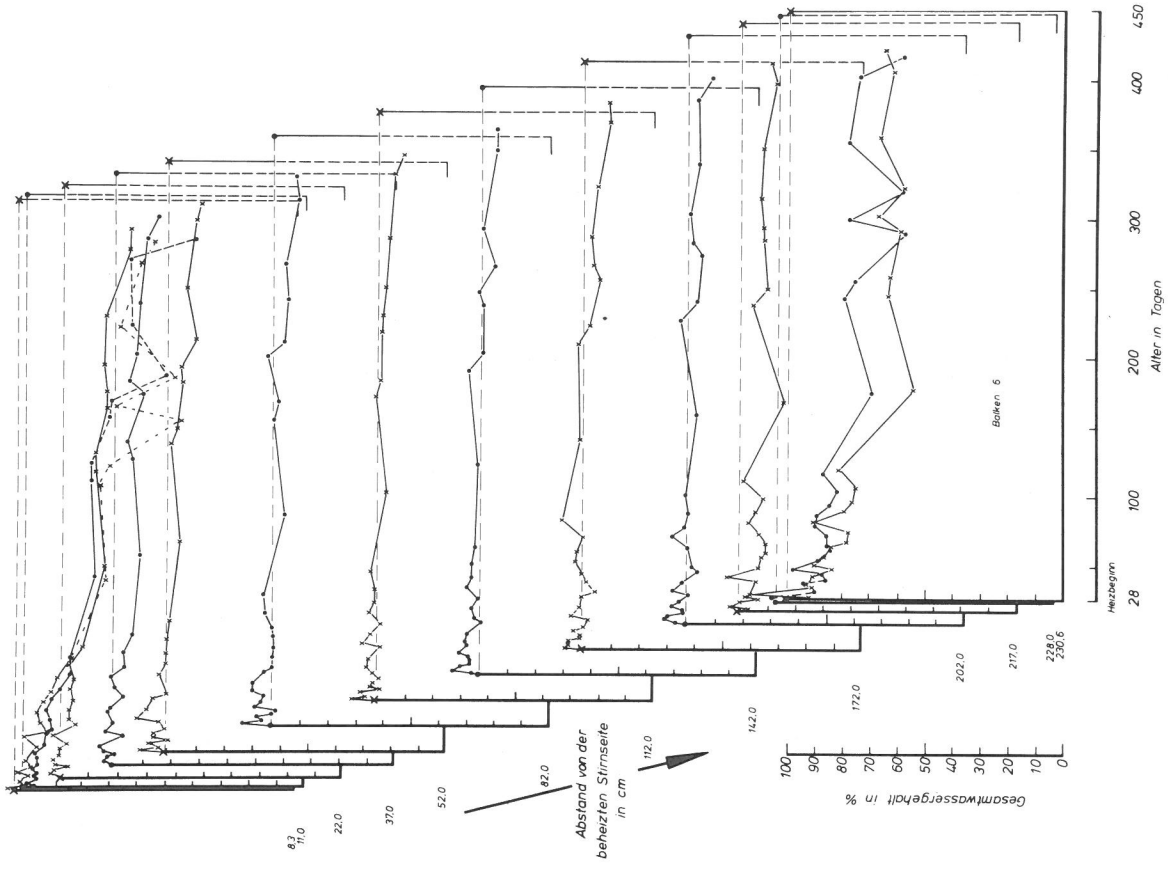


Bild A 16

Entwicklung des Gesamtwassergehaltes (in Prozent des Ausgangswertes vor Heizbeginn) in Abhängigkeit vom Betonalter; angetragen für 13 Ortskoordinaten (Abstand von der beheizten Stirnseite) des Balkens 6 (vgl. dazu Abschn. 2.2.3.3)

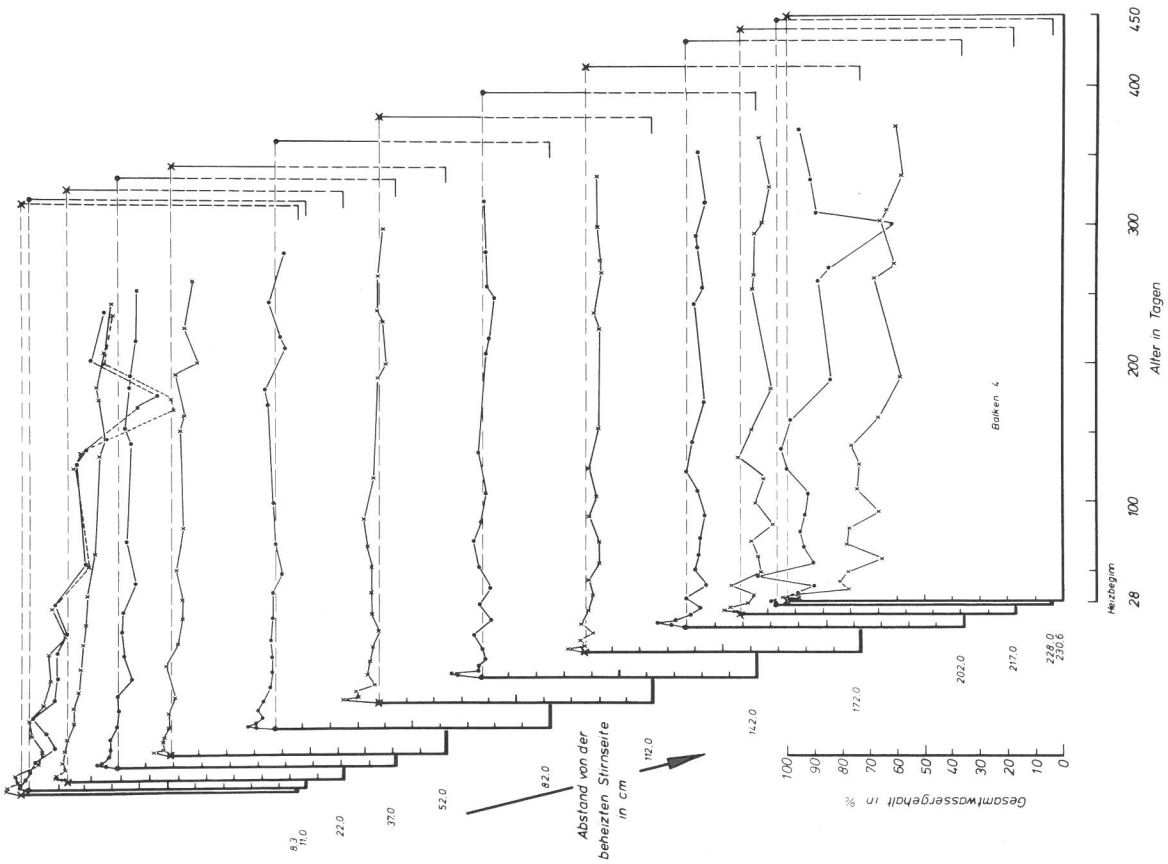


Bild A 15

Entwicklung des Gesamtwassergehaltes (in Prozent des Ausgangswertes vor Heizbeginn) in Abhängigkeit vom Betonalter; angetragen für 13 Ortskoordinaten (Abstand von der beheizten Stirnseite) des Balkens 4 (vgl. dazu Abschn. 2.2.3.3)

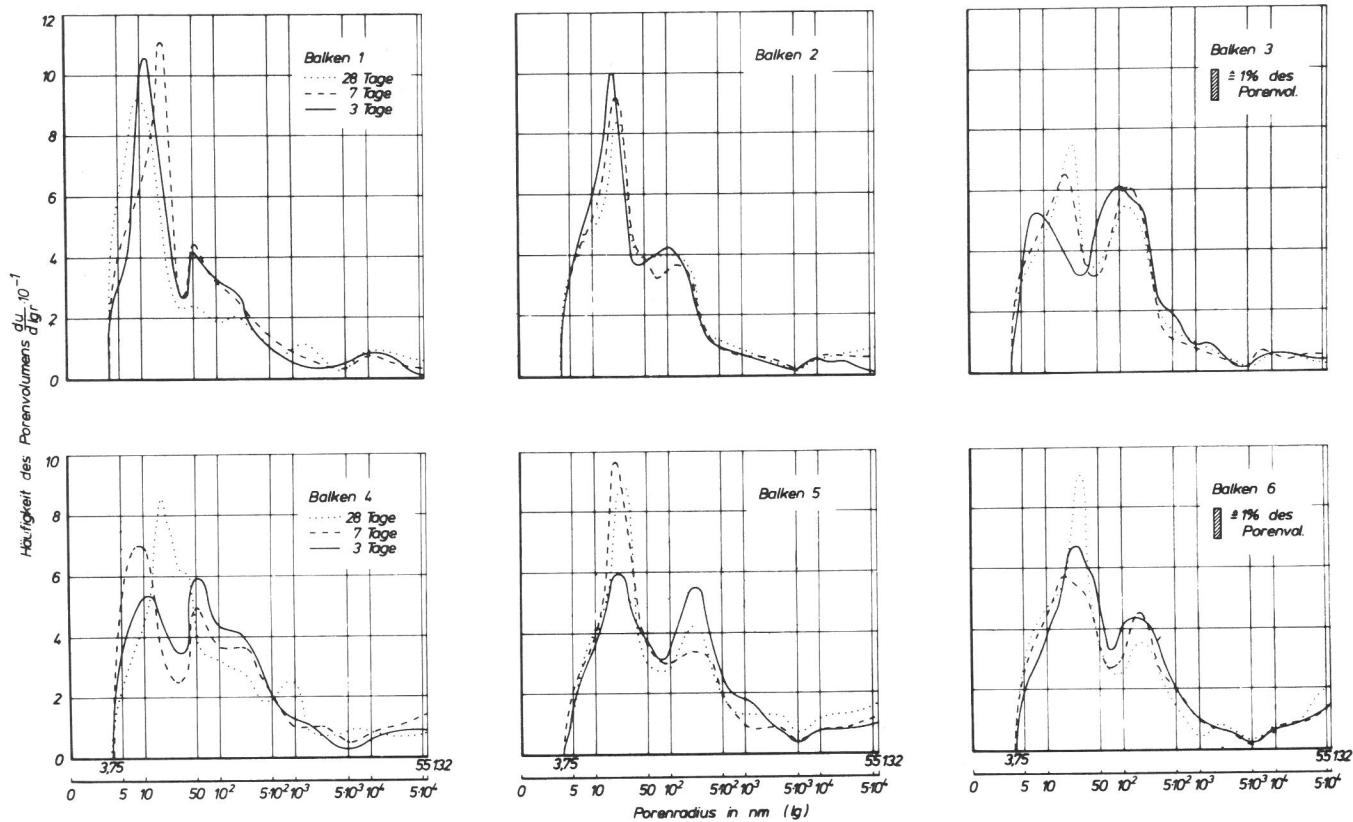


Bild A 17
Häufigkeitsverteilung des Porenvolumens der Matrixmörtel der calcitischen Betone (Balken 1 bis 3) und Kiessand-Betone (Balken 4 bis 6) im Alter von 3, 7 und 28 Tagen (vgl. dazu Abschn. 2.3.4.2)

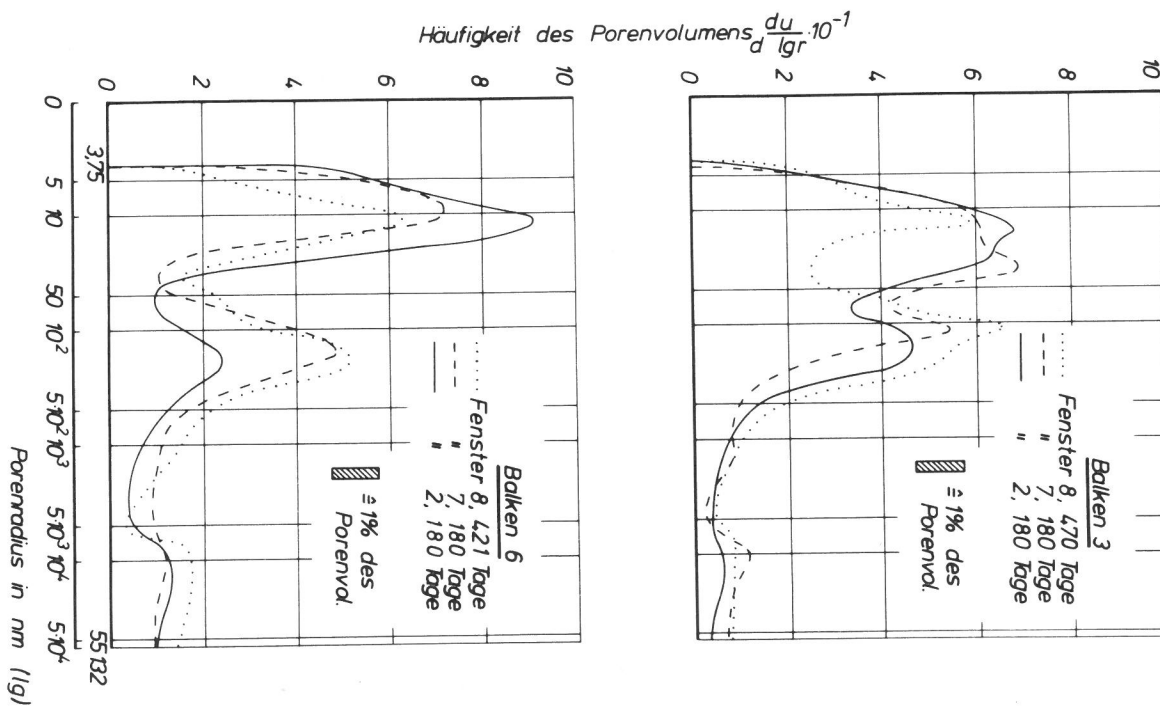


Bild A 18
Häufigkeitsverteilung des Porenvolumens von Matrixmörtel aus den Fenstern 8, 7 und 2 des Balkens 3 (calcitischen Betone; Alter 180 und 470 Tage) sowie des Balkens 6 (Kiessand-Beton; Alter 180 und 421 Tage) (vgl. dazu Abschn. 2.3.4.2)

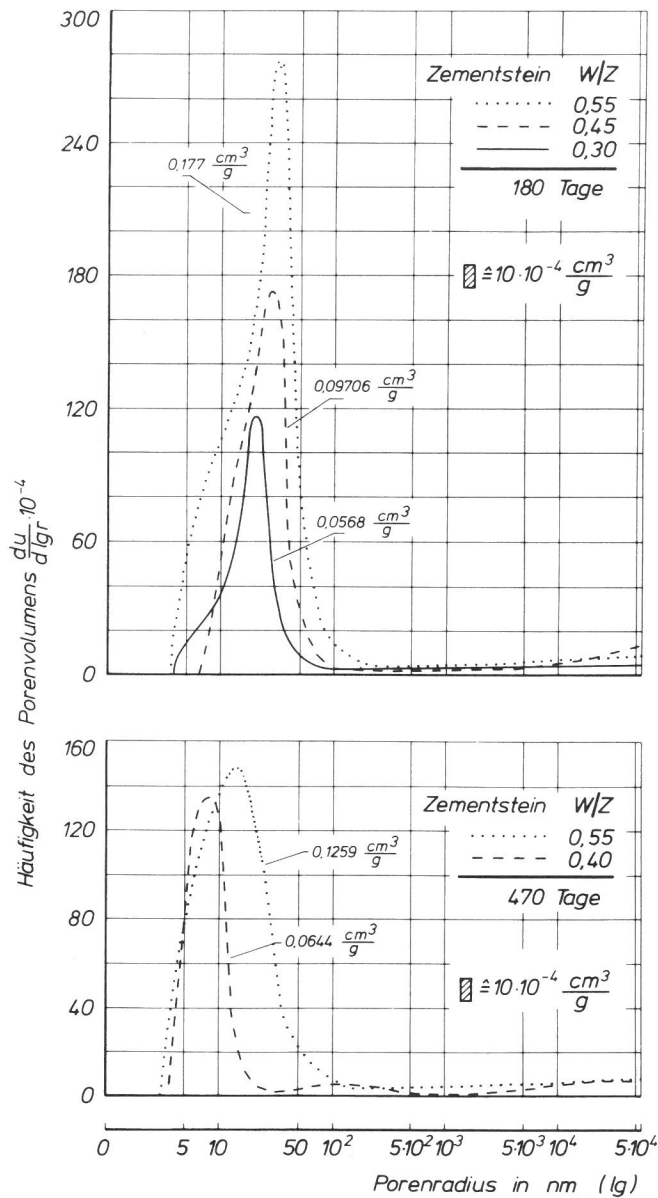


Bild A 19
Häufigkeitsverteilungen der gewichtsbezogenen Porenvolumina von Zementstein mit verschiedenen W/Z-Werten im Alter von 180 und 470 Tagen (vgl. dazu Abschn. 2.3.4.2)

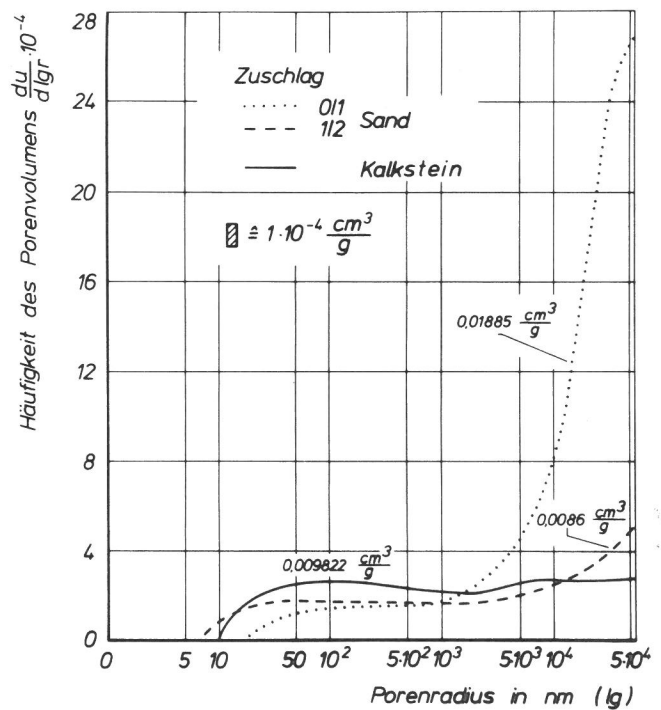
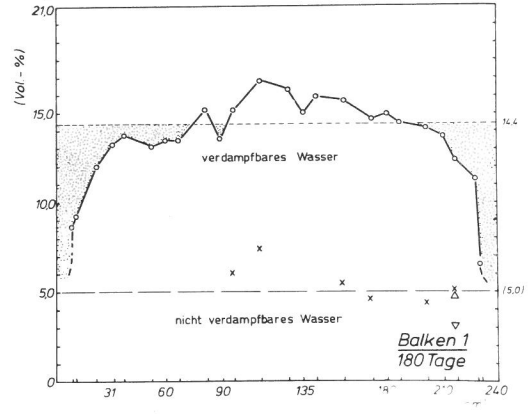
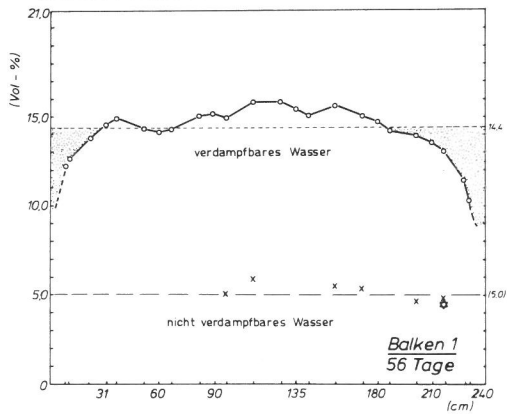
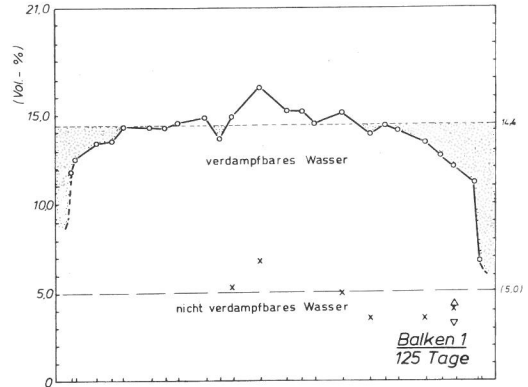
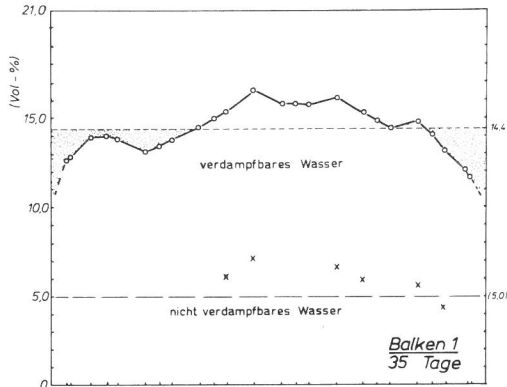
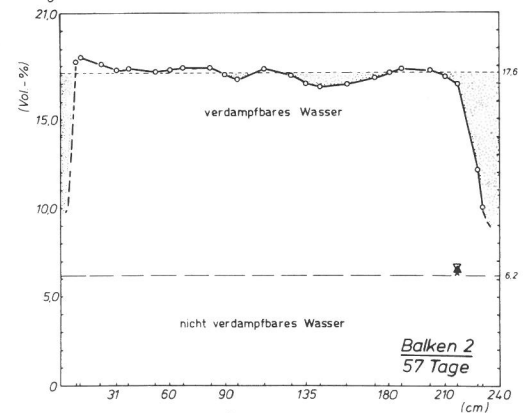
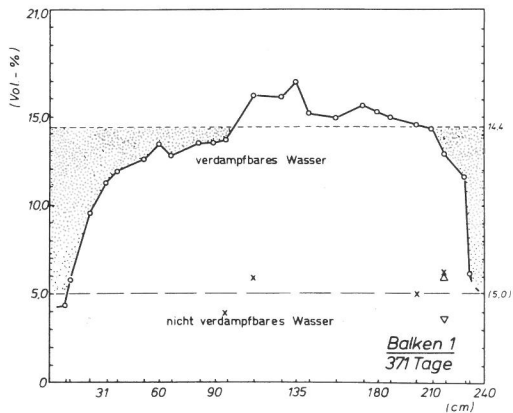
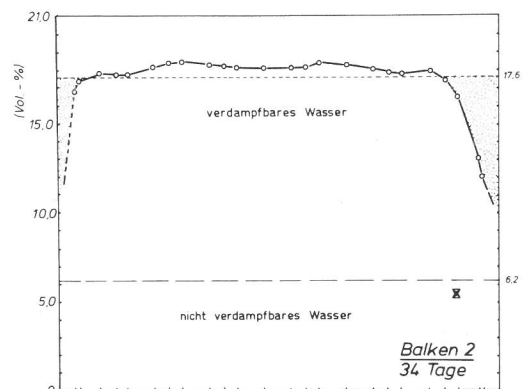
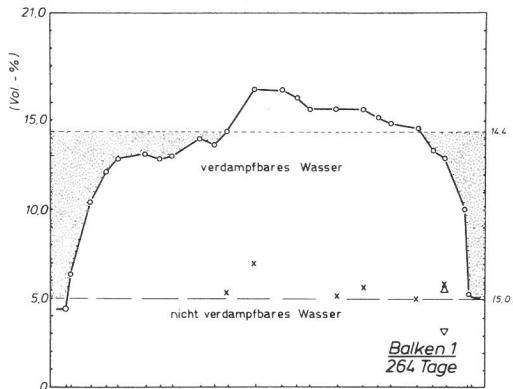


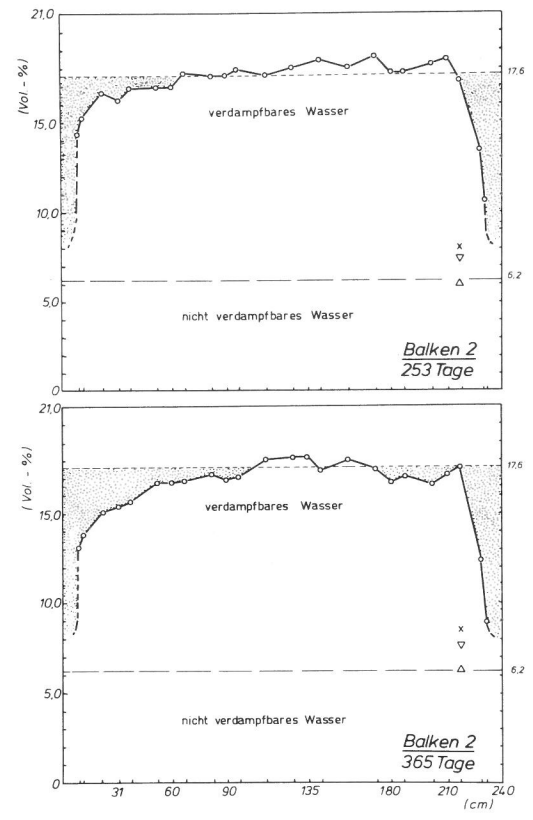
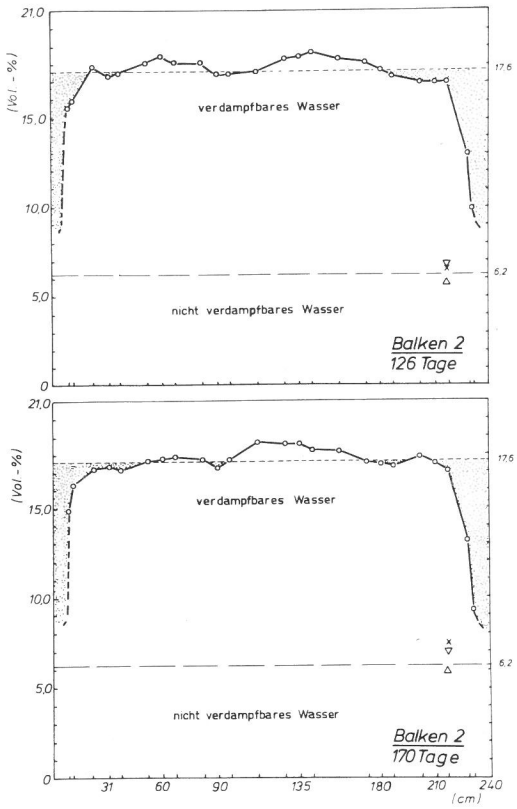
Bild A 20
Häufigkeitsverteilungen der gewichtsbezogenen Porenvolumina von Proben des Kiessand- und calcitischen Zuschlages (Kalkstein) (vgl. dazu Abschn. 2.3.4.2)



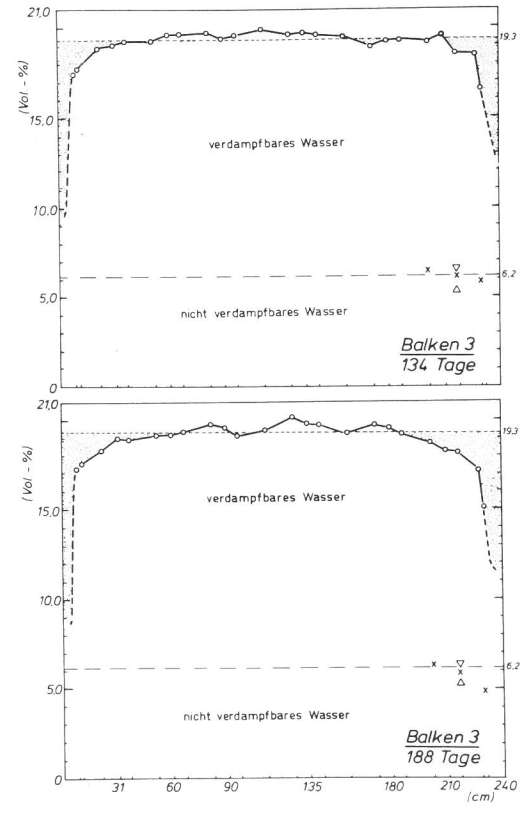
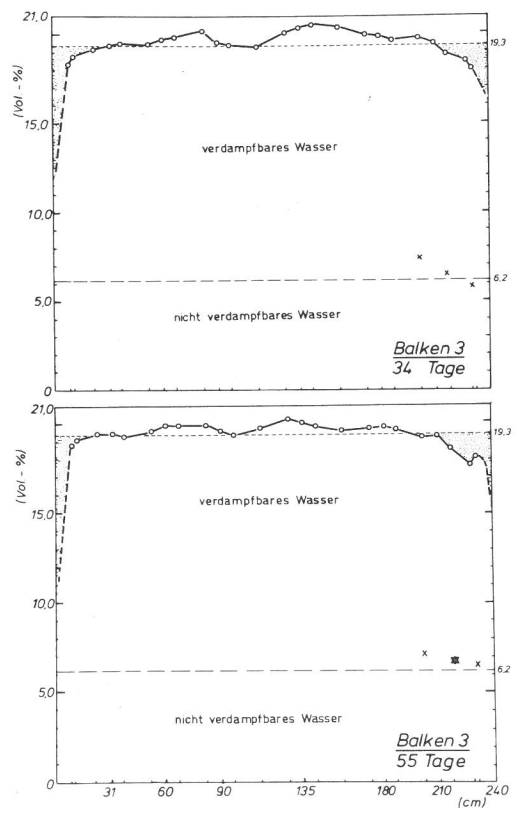
Bilder A 21, A 22
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung
 der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt
 (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



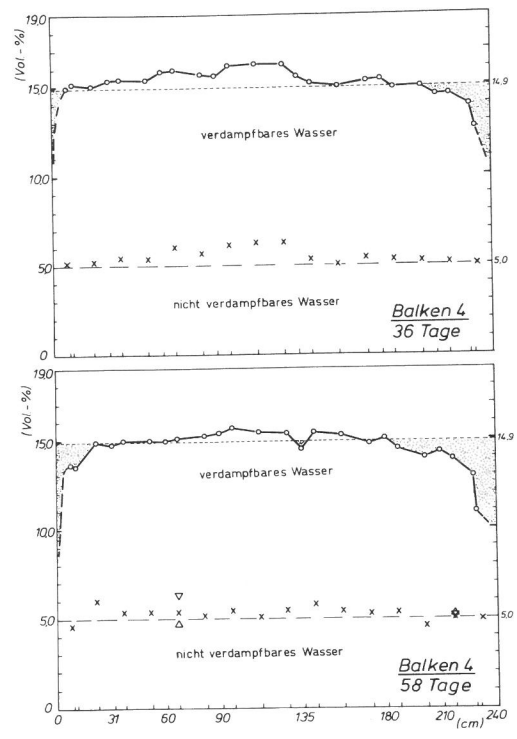
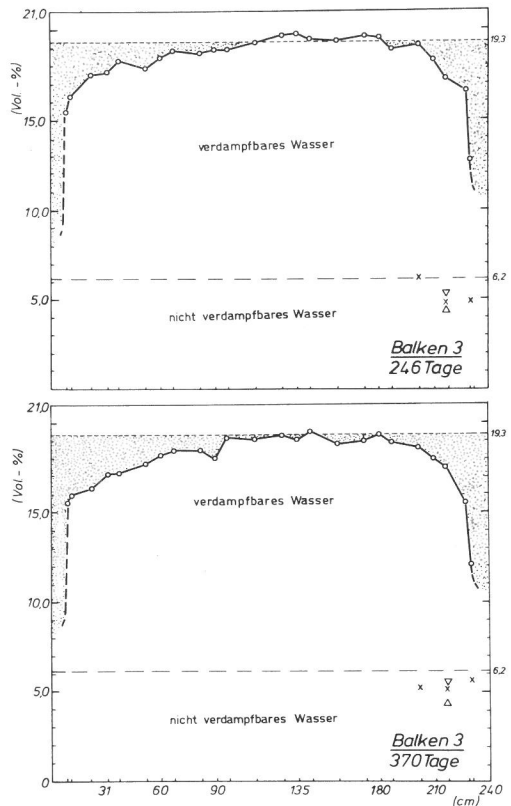
Bilder A 23, A 24
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung
 der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt
 (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



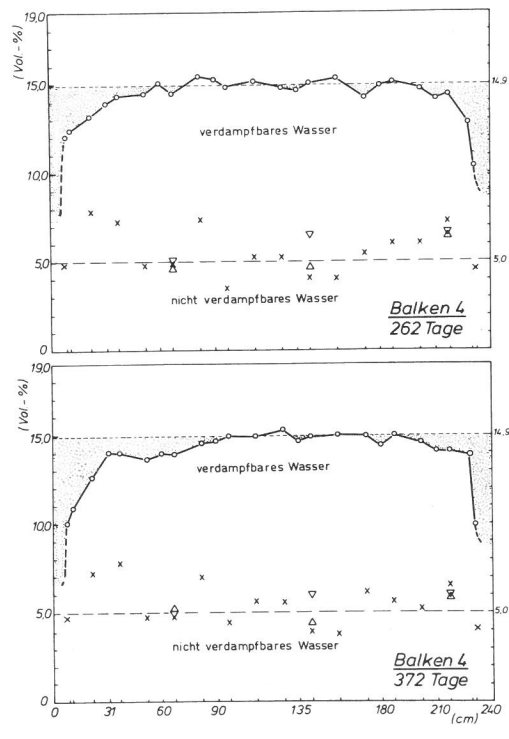
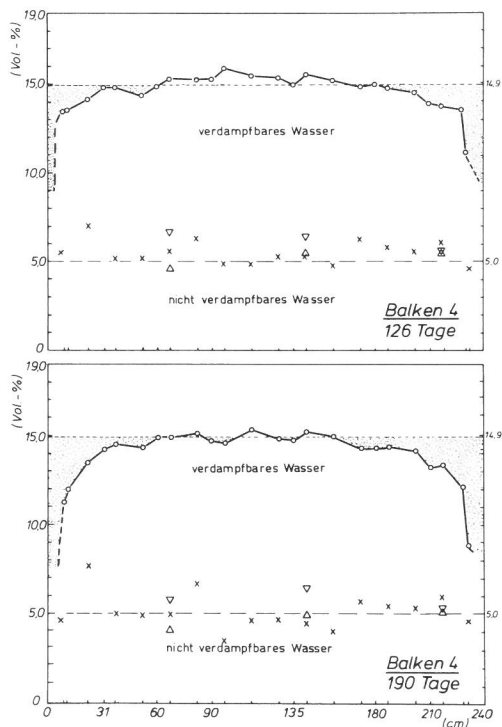
Bilder A 25, A 26
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



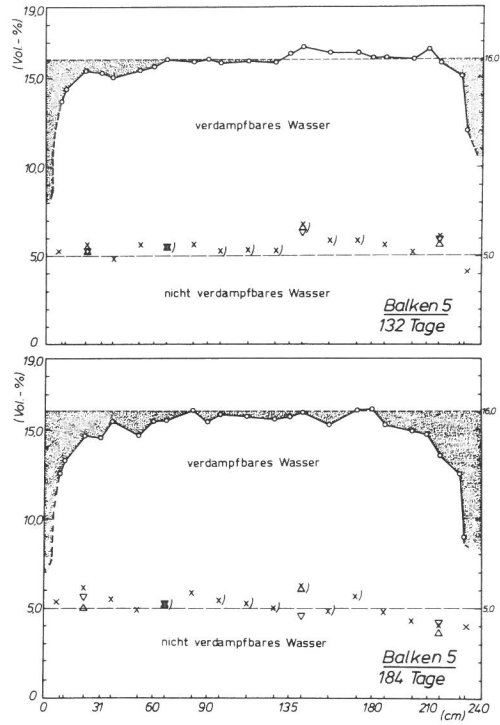
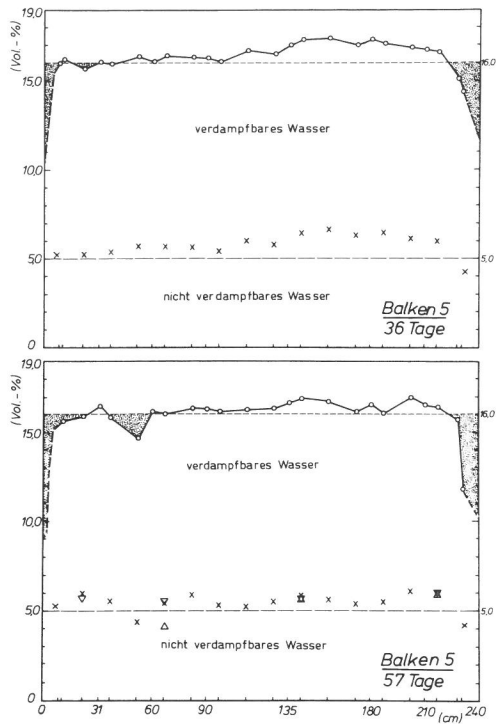
Bilder A 27, A 28
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



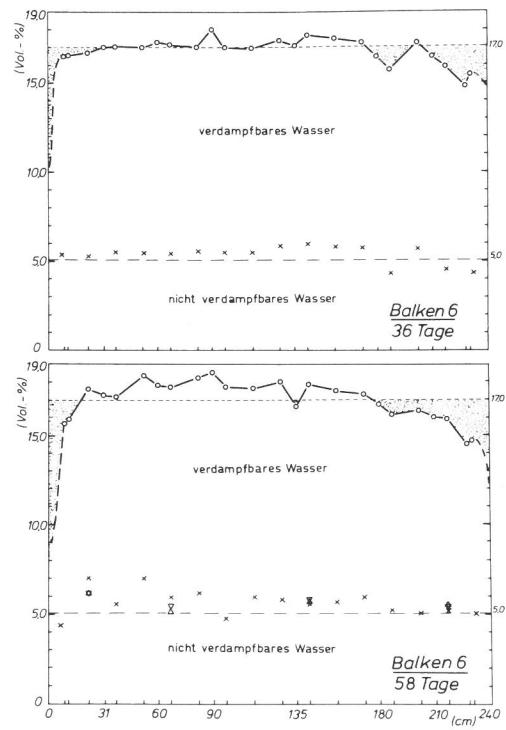
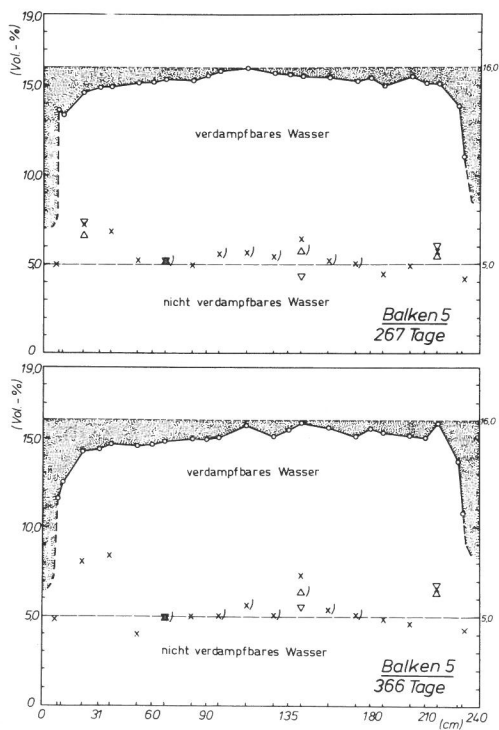
Bilder A 29, A 30
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung
 der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt
 (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



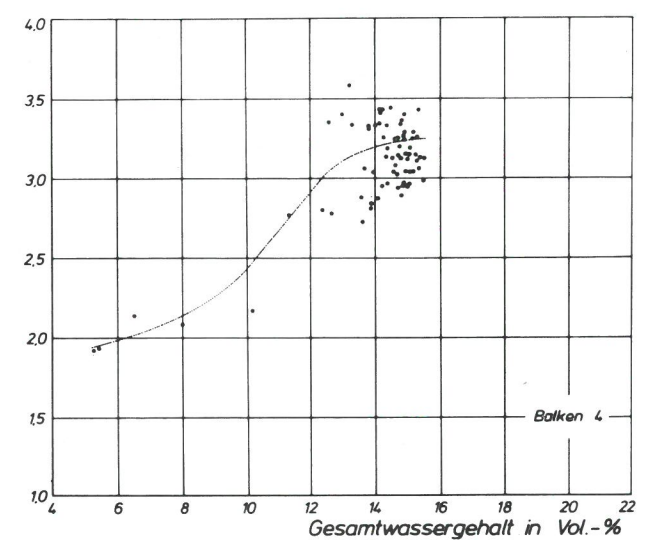
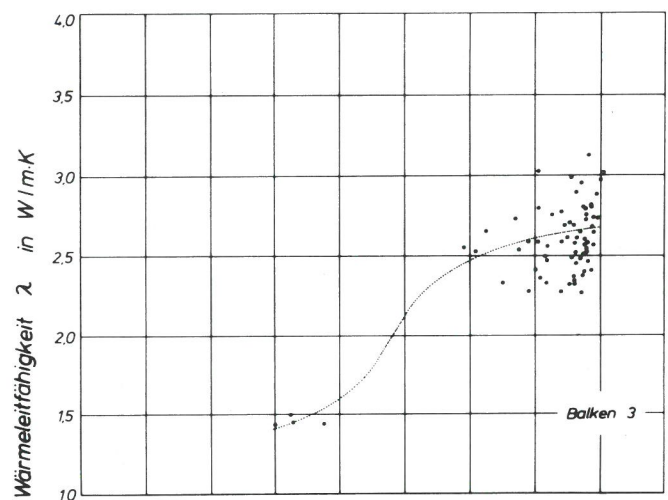
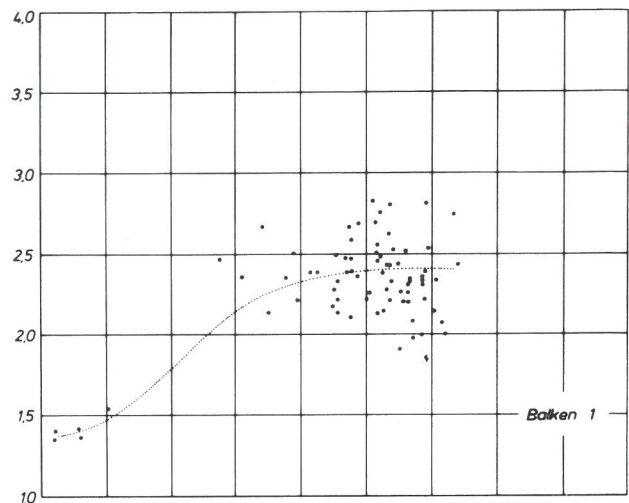
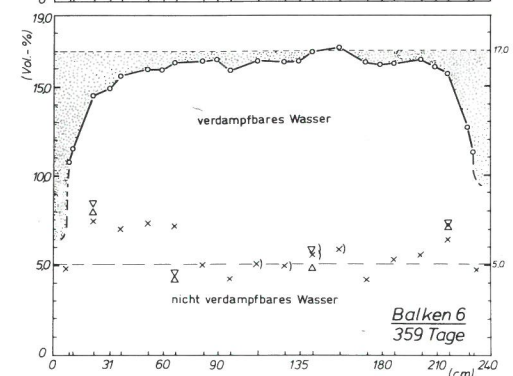
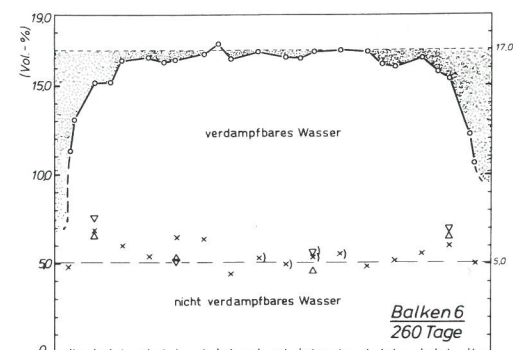
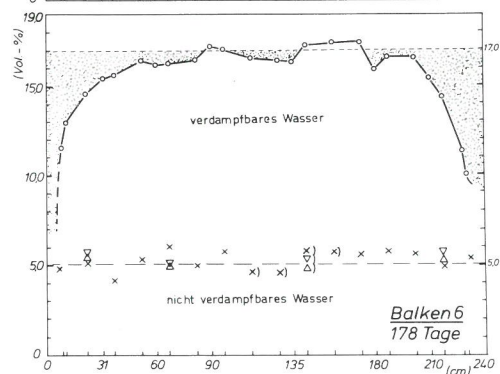
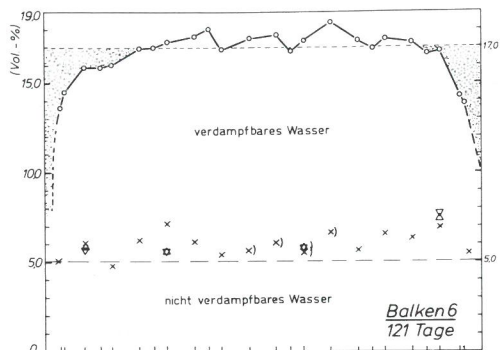
Bilder A 31, A 32
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung
 der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt
 (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



Bilder A 33, A 34
Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



Bilder A 35, A 36
Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)



Bilder A 37, A 38
 Bilanzen der Wassergehalte über die Balkenlänge; die obere Begrenzung der punktierten Felder entspricht dem mittleren Ausgangswassergehalt (vgl. dazu Abschn. 2.5.1)

Bild A 39
 Wärmeleitfähigkeit (λ) in Abhängigkeit vom Wassergehalt mit Ausgleichskurve für die Balken 1, 3 und 4 (vgl. dazu Bild 59 in Abschn. 2.5.3)