

Einfluss der Rissbreite auf die Korrosion
von Stahl in Leichtbeton. Tl. III.

F 2013

F 2013

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Der Bundesminister für Wohnungsbau

Abschluß - Zwischen - Bericht
zum Forschungs - Auftrag

Az.: B 16-800182-13 Eing.: 3.10.85

Sammlung der
Forschungsberichte
des Referats

Nr. 2013

B 56

LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU
INSTITUT FÜR BAUINGENIEURWESEN III
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
O. PROF. DR.-ING. HERBERT KUPFER

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR BAUINGENIEURWESEN III
LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU
O. PROF. DR.-ING. HERBERT KUPFER
Nr. 1239/He/K

8000 MÜNCHEN 2, 2.9.1985
Arclestraße 21
Postfach 202420
Tel. (089) 2105-3029
Telex 522854 2105-3031

Einfluß der Ribbreite auf die Korrosion von Stahl in Leichtbeton

Teil III

Ergebnisse nach 11jähriger Auslagerungsdauer

Bericht erstattet von

Dipl.-Ing. M. Hergenröder

Dipl.-Ing. H.H. Müller

TEXT

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht werden.
Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf
der vorherigen Genehmigung des Instituts für Massivbau.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Überblick	1
2. Beschreibung der durchgeführten Versuche	2
2.1 Untersuchte Einflußgrößen	2
2.1.1 Einfluß der Rißbreite	2
2.1.3 Einfluß der Betondeckung	3
2.1.4 Einfluß der Betonzusammensetzung	3
2.1.5 Einfluß der klimatischen Umweltbedingungen	4
2.1.6 Einfluß der Zeit auf das Ausmaß der Korrosion	4
2.1.7 Zusammenfassung	5
2.2 Versuchskörper	5
2.3 Versuchsmaterial	6
2.3.1 Beton	6
2.3.2 Bewehrung	7
2.4 Umfang der Versuche	7
2.5 Auslagerungsstellen - Lage und klimatischen Verhältnisse	8
2.5.1 Lage zur Wetterrichtung	8
2.5.2 Lagerung im Ruhrgebiet (stark verunreinigte Industrieluft)	8
2.5.3 Lagerung in München (normales Großstadtklima)	8
2.6 Belastung und Auslagerung der Balken	9
2.6.1 Auslagerungstermine	9
2.6.2 Belastung der Balken	9
2.6.3 Messung der Rißbreiten	10
2.7 Entnahme der Balken	11
3. Versuchsergebnisse	12
3.1 Aussehen der Versuchskörper	12
3.2 Rißbreiten	13
3.3 Betondeckung	14
3.4 Karbonatisierung	14
3.4.1 Karbonatisierungstiefe im ungerissenen Beton nach 11jähriger Auslagerung	15
3.4.2 Karbonatisierung an Rissen	22

	Seite
3.5 Luftporengehalt und Gasdurchlässigkeit	22
3.5.1 Luftporengehalt	22
3.5.2 Gasdurchlässigkeit	23
3.6 Festgestellte Korrosionshäufigkeit	24
3.6.1 Korrosionshäufigkeit der Längsbewehrung an Rißstellen	25
3.6.2 Korrosionshäufigkeit der Längsbewehrung im ungerissenen Beton	32
3.6.3 Korrosionshäufigkeit an den Bügeln und Querstäben	35
3.6.4 Korrosionshäufigkeit an der Bewehrung der Zwischenstücke	37
4. Intensität der Korrosion	38
4.0 Vorbemerkung	38
4.1 Maßstab zur Beurteilung des Ausmaßes der Korrosion	39
4.2 Meßgebende Rißbreite	43
4.3 Art der Darstellung der Versuchsergebnisse	44
4.4 Korrosion der Längsbewehrung	45
4.4.1 Einfluß der Lage der Versuchskörper	45
4.4.2 Einfluß der Verbügelung auf die Korrosion der Längsbewehrung	46
4.4.3 Einfluß der Betondeckung	47
4.4.4 Einfluß der Rißbreite bei Leichtbeton und bei Normalbeton	49
4.4.5 Einfluß der Auslagerungsdauer	57
4.5 Korrosion an Querstäben bzw. Bügeln	58
4.5.1 Korrosion an Rißstellen	58
4.5.2 Korrosion im ungerissenen Bereich	59
4.6 Auswirkung der Korrosionsschäden auf die Eigenschaften der Stähle	60
5. Zusammenfassung	61
Literatur	63

<u>Tabelle</u>	Seite
1 : Betondeckung der Bewehrung	3
2 : Versuchsplan und Anzahl der Versuchskörper	4
3 : Wesentliche Daten der nach 11jähriger Auslagerung entnommenen Versuchskörper	5
4 : Herstellungs- und Auslagerungstermine	9
5 : Spannungsverluste /%/ in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer	11
6 : Mittlere Rißbreiten vor und nach der Auslagerung	13
7 : Gemessene Karbonatisierungstiefen in /mm/	15
8 : Wasseraufnahmevermögen als Maßstab für den Luftporengehalt	22
9 : Gasdurchlässigkeit der Betone	23
10 : Häufigkeit der Korrosion an der Längsbewehrung im ungerissenen Bereich	33
11 : Korrosion an den Stabenden	34
12 : Längsrisse in den Zwischenstücken	37
13 : Prozentanteil der Querschnittsschwächung $\Delta A > 0,5\%$ an der Bewehrung an Rißstellen	48
14 : Prozentanteil der Querschnittsschwächung $\Delta A > 0,5\%$ an der Bewehrung im ungerissenen Bereich	49

<u>Bild</u>	Seite
1 : Lage der Balken	8
2 : Belastung der Balken bei der Auslagerung	10
3 : Ablesestellen der Rißbreiten	10
4 : Lage der Meßstellen für die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und Lage der Balken während der Auslagerung	15
5 : Mittlere und maximale Karbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von Betonart und Auslagerungsort	16
6 : Schematische Darstellung der Karbonatisierungstiefen	18
7 : Geringe Karbonatisierungstiefen an der Betonunterseite	21
8 : Karbonatisierungsspitzen an der Auslagerungsunterseite	21
9 : Einfluß der Betonart auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen	25
10 : Einfluß der Betonart und des Versuchskörpertyps auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen	27
11 : Rißbreiten bei den verschiedenen Versuchskörpertypen und Betonarten	28
12 : Korrosionshäufigkeit in Abhängigkeit von der Rißbreite	29
13 : Schematischer Zusammenhang zwischen Korrosionshäufigkeit und Auslagerungsdauer	30
14 : Einfluß der Rißbreite und des Auslagerungsorts auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen	31
15 : Korrosionshäufigkeit an der Querbewehrung	36
16 : Beispiele für die Rostgrade Ro1 bis Ro4	40
17a: Beispiel für Rostgrad Ro1	41
b: " " " Ro2	41
c: " " " Ro3	42
d: " " " Ro4	42
18-23 : Vergleich der mittleren Querschnittsschwächungen aller Messungen mit den mittleren Querschnittsschwächungen $\Delta A > 0,5\%$	52
24-25 : Einfluß der Betonart	55
26-27 : Einfluß der Betondeckung	55

Bild	Seite
28-29 : Einfluß der Betonart und der Betondeckung	56
30-31 : Einfluß des Auslagerungsorts	56
32-34 : Einfluß der Auslagerungsdauer auf die Korrosionsabtragung	57
35 : Lage der Ablesestellen für die Korrosionsbestimmungen an der Querbewehrung	58

1. Überblick

Im Rahmen eines Auslagerungsprogramms soll der Einfluß der Rißbreite auf die Korrosionsabtragung an der Bewehrung in LEICHTBETON in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer für unterschiedliche Betondeckungen und Umweltbedingungen studiert werden. Zu diesem Zweck wurden vom Institut für Massivbau der Technischen Universität München im Jahre 1971 insgesamt 80 Versuchsbalken unterschiedlicher Betonzusammensetzung (3 verschiedene Leichtbetonarten L 1, L 2, L 3, zum Vergleich 24 Balken aus Normalbeton N) im Freien ausgelagert. Je 2 dieser Versuchskörper wurden paarweise über ein Zwischenstück so zusammengespannt, daß sich während der gesamten Auslagerung ständig offene Risse in der bewehrten Zugzone befanden.

Die Abmessungen der Balken entsprachen den bei früheren Versuchsprogrammen mit Normalbeton verwendeten Versuchskörpern. Die Biegezugbewehrung bestand aus 2 \varnothing 8 mm, BSt 420/500 RU, die Querbewehrung aus innenliegenden Querstäben (Typ „P“) bzw. aus Bügeln (Typ „B“) \varnothing 8 mm. 74 dieser Versuchsbalken wurden auf Holzböcken im Ruhrgebiet auf dem Gelände der Friedrich Krupp-Hüttenwerke in Rheinhausen ausgelagert (stark verunreinigte Industrieluft), die restlichen 6 Balken (nur Leichtbeton L 1) lagern zum Vergleich auf einem Versuchsgelände in München-Freimann (normales Großstadtklima).

Nach dreijähriger Auslagerung wurden im Oktober 1974 insgesamt 16 der im Ruhrgebiet lagernden Balken entnommen, in noch zusammengespanntem Zustand die Rißbreiten bestimmt, die Balkenpaare entspannt und zur weiteren Untersuchung nach München transportiert. Im Bericht Nr. 1179 vom 10.5.1976 /5/ wurden die Herstellung und Auslagerung der Balken sowie die Ergebnisse dieser ersten Entnahme (nach 3 Jahren) beschrieben.

Im Oktober 1977 wurden nach sechsjähriger Auslagerung im Freien 22 weitere Versuchskörper entnommen. Im Bericht Nr. 1112 vom März 1980 /7/ wurden die Ergebnisse der zweiten Entnahme zusammengefaßt und ausgewertet.

Im Oktober 1982 wurden nach nunmehr 11jähriger Auslagerung 18 Versuchskörper aus Rheinhausen sowie 2 Balken, die in München (8 Jahre) gelagert waren, untersucht. Im vorliegenden Bericht wird auf die Ergebnisse dieser dritten Entnahme eingegangen.

Statt des ursprünglich vorgesehenen Umfangs dieser Entnahme von 42 Balken wurden nur 20 Balken entnommen. Die restlichen Balken sollen nach 15jähriger Auslagerungszeit im Jahr 1986 untersucht werden.

Diese Änderung der Laufzeit des Versuchsprogramms von 10 auf 15 Jahre wurde vorgenommen, da sie die Gelegenheit bot, weiter reichende Langzeiterfahrung an gerissenen Stahlleichtbetonbauteilen zu sammeln.

Sie wurde bereits in unserem Forschungsantrag mit dem teilweise erheblich größeren Korrosionsfortschritt an Stahleinlagen im gerissenen Leichtbeton im Vergleich zu Versuchskörpern aus Normalbeton begründet.

2. Beschreibung der durchgeführten Versuche

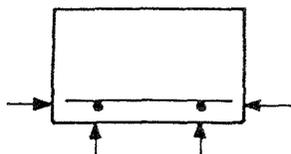
2.1 Untersuchte Einflußgrößen

2.1.1 Einfluß der Rißbreite

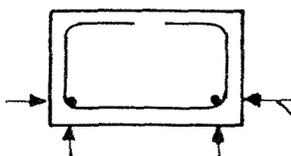
Beim Zusammenspannen der Versuchskörper entstanden auf der Zugseite je Balken zwischen 7 und 21 Querrisse mit Rißbreiten von ca. 0,01 bis ca. 0,40 mm. Die meisten Risse verliefen über die gesamte Balkenbreite und ermöglichten somit je Riß vier Rißbreitenbestimmungen jeweils an den Balkenunterseiten und Seitenflächen an der Projektion der Längsstäbe (Stahl a, Stahl b). An insgesamt 472 Rissen konnten die Breiten bestimmt werden.

2.1.2 Einfluß der Bewehrung

Es wurden verschiedene Bewehrungsanordnungen ausgeführt:



Typ „P“ = Balken mit auf der Zugseite außenliegender Längsbewehrung und innenliegenden Querstäben (Plattentyp)



Typ „B“ = Balken mit innenliegenden Längsstäben sowie Bügelbewehrung auf der halben Balkenlänge.

Rißbreitenablesungen

Jedes Versuchskörperpaar wurde über ein Betonzwischenstück (vgl. Bild 41 Anlage 7) zusammengespannt. Die Zwischenstücke waren jeweils mit vier 8 mm-Stäben bewehrt.

Die gesamte Bewehrung bestand aus \varnothing 8 mm, BSt 420/500 RU (naturharter Rippenstahl, nicht schweißbar).

2.1.3 Einfluß der Betondeckung

Die Betondeckung c wurde je Balkentyp zweifach variiert.

Typ 1: Betondeckung der äußeren Bewehrungslage 1,5 cm

Typ 2: " " " " 2,5 cm

Somit ergeben sich folgende Betondeckungen c :

Tabelle 1: Betondeckung der Bewehrung

Typ	Betondeckung der	
	Längsbewehrung	Querbewehrung
P 1	1,5 cm	2,3 cm
P 2	2,5 cm	3,3 cm
B 1	2,6 cm	1,5 cm
B 2	3,6 cm	2,5 cm

Die Betondeckung der Bewehrungsstäbe in den Zwischenstücken variierte zwischen 1,5 cm und 4 cm.

2.1.4 Einfluß der Betonzusammensetzung

Es wurden 3 Leichtbetone und ein Normalbeton jeweils B 25 gewählt.

Sie hatten die folgenden Zusammensetzungen:

L 1: Leichtbeton mit Zuschlägen aus Blähton (Liapor 5) und
Leichtsand (Liasand), Zementgehalt 300 kg/m^3 PZ 35 F

L 2: Leichtbeton mit Zuschlägen aus Blähschiefer (Berwilit
und Leichtsand (Liasand), Zementgehalt 300 kg/m^3 PZ 35 F

L 3: Leichtbeton mit Zuschlägen aus Blähton (Liapor 5)
und Natursand (0/3 mm), Zementgehalt 300 kg/m^3 PZ 35 F

N : Normalbeton mit Rheinkieszuschlägen 0/16 mm,
Zementgehalt 240 kg/m^3 PZ 35 F

Der angestrebte Wasser-Zement-Wert (W/Z) betrug bei L 1, L 2, L 3 W/Z = 0,5, bei N W/Z = 0,75; die Konsistenz des Frischbetons lag stets im Bereich K 2 an der Grenze zu K 1. Die zugegebene Zementmenge (PZ 35 F Märker Zementwerk) entsprach jeweils dem erforderlichen Mindestzementgehalt.

Es wurden immer ein Balkenpaar (z.B. P 1/L 2/3 und P 1/L 2/4), das dazugehörige Zwischenstück (P 1/L 2/3,4) und sämtliche Probewürfel gemeinsam betoniert und unter gleichen Bedingungen gelagert.

Sämtliche Zement-, Zuschlags- und Betonkenndaten sind den Anlagen 1 bis 5 zu entnehmen.

2.1.5 Einfluß der klimatischen Umweltbedingungen

74 der insgesamt 80 Versuchsbalken des Programms wurden im Ruhrgebiet auf dem Gelände der Friedrich Krupp-Hüttenwerke in Rheinhausen ausgelagert (stark verunreinigte Industrieluft). Zum Vergleich wurden auf einem Versuchsgelände in München-Freimann (normales Großstadtklima) 6 Balken ausgelagert. Dabei wurde ausschließlich Leichtbeton (L 1) verwendet, da entsprechende Erfahrungen mit Normalbeton bereits aus früheren Versuchsprogrammen am selben Auslagerungsort vorliegen.

2.1.6 Einfluß der Zeit auf das Ausmaß der Korrosion

Die bisherigen Entnahmen erfolgten nach 3, 6 und 11 Jahren; die letzte noch ausstehende Entnahme ist nach einer Auslagerungsdauer von 15 Jahren im Jahre 1986 vorgesehen. In Tabelle 2 ist der Versuchsplan mit Angabe der Anzahl der Versuchskörper und der Entnahmen dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsplan und Anzahl der Versuchskörper

Auslagerungsort		Ruhrgebiet								München	
		P1		P2		B1				B2	B1
Beton		L1	N	L1	N	L1	L2	L3	N	L1	L1
Entnahme nach	3 Jahren	2	2	2	2	2	2	2	2	-	-
	6 Jahren	4	2	2	2	4	2	2	2	2	-
	10 Jahren	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	15 Jahren	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4

*) tatsächliche Entnahme: nach 11 Jahren

Tabelle 3: Wesentliche Daten der nach 11jähriger Auslagerung entnommenen Versuchskörper

Körperart	Betondeckung /cm/		Lage der Querbewehrung	Anzahl der Versuchskörper mit Leichtbeton			Normalbeton N
	„unten“	„seitlich“		L1	L2	L3	
				Blähton Leichtsand	Blähschiefer Leichtsand	Blähton Natur-sand	
P1	1,5	6,1	innen	4	-	-	2
P2	2,5	6,1	innen	2	-	-	2
B1	2,6	2,6	außen	2	2	2	2
B2	3,6	3,6	außen	2	-	-	-

2.1.7 Zusammenfassung

Zur leichteren Orientierung wurden die wichtigsten Daten der Versuchskörper auf einer seitlich ausfaltbaren Seite am Ende des Berichtes zusammengefaßt.

2.2 Versuchskörper

Die Abmessungen der Versuchskörper wurden wegen besserer Vergleichsmöglichkeiten in Anlehnung an bereits bestehende Versuchsreihen für Normalbeton gewählt. Für die Wahl der Abmessungen der Versuchskörper war ein Kompromiß zwischen folgenden Forderungen zu finden:

- möglichst hoher Bewehrungsprozentsatz, um Beobachtungen an möglichst vielen Bewehrungsstäben durchführen zu können;
- möglichst viele Risse, darunter solche mit Rißbreiten bis wenigstens 0,3 mm, um Beobachtungen an möglichst vielen Rissen durchführen zu können;
- Beanspruchungen der Bewehrung kleiner als Streckgrenze, Beanspruchung des Betons kleiner als Rechenfestigkeit;
- Gewicht eines Balkenpaares nicht größer, als daß es noch ohne Hebe-geräte zu handhaben ist

Diese Forderungen führen zu den folgenden, bereits wiederholt für Auslagerungsversuche angewendeten Balkenabmessungen:

Balkenlänge 2,0 m, Querschnittsbreite 25 cm, Querschnittshöhe 15 cm (siehe Bild 40, Anlage 6 bzw. Bild 41, Anlage 7).

Als Längsbewehrung sind 2 \emptyset 8 mm BST 420/500 RU eingebaut. Während beim Plattentyp P1 und P2 die Querbewehrung in einem Abstand von 20 cm über die ganze Balkenlänge verteilt ist, wurden beim Balkentyp B1 und B2 nur in einer Balkenhälfte Bügel im Abstand von 20 cm angeordnet. Als Bewehrung wurden in beiden Fällen ebenfalls \emptyset 8 mm, BST 420/500 RU verwendet.

Die Betondeckungsmaße für die einzelnen Balkentypen sind Tabelle 1 (Seite 3) zu entnehmen.

Zur Einhaltung der vorgesehenen Betondeckungen wurden an der Längsbewehrung bzw. an den Bügeln Abstandhalter aus Kunststoff (EXTE-Klemmabstandhalter) angebracht.

In den Zwischenstücken (siehe Bild 40, Anlage 6) sind jeweils 4 \emptyset 8 mm, BST 420/500 RU mit Betondeckungen von 1,5 bis 4 cm eingebaut.

2.3 Versuchsmaterial

2.3.1 Beton

In Deutschland werden für die Herstellung von Stahlleichtbeton fast ausschließlich geblähte Tone und Schiefer verwendet, die sich u.a. in ihrer Kornform und Porenstruktur voneinander unterscheiden. Da sich hierdurch möglicherweise unterschiedliche Korrosionsbedingungen für Betonstahl in Leichtbeton ergeben können, wurden zur Herstellung der Versuchskörper typische Vertreter dieser beiden Zuschlagsarten verwendet:

Leichtbeton L1 mit Zuschlägen Blähton, Liapor 5 (4/8 mm, 8/16 mm) und Liasand (0/4 mm) (siehe Anlage 2)

Leichtbeton L2 mit Zuschlägen aus Blähschiefer - Berwilit (0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm) (siehe Anlage 3)

Leichtbeton L3 mit Natursand und Leichtzuschlägen aus Blähton (Liapor 4/8 mm, 8/16 mm) (siehe Anlage 4).

Diese Auswahl wurde getroffen, da insbesondere die Frage nach der unterschiedlichen Wirksamkeit des Korrosionsschutzes des Natursandhaltigen Betons L 3 im Gegensatz zu L 1 und L 2 beantwortet werden sollte.

Zusätzlich zu diesen Leichtbetonbalken wurden für die Auslagerung in Rheinhausen Vergleichskörper aus Normalbeton hergestellt.

Normalbeton N mit Rheinkieszuschlägen 0 - 16 mm

Für die Leichtbetone wurde ein Wasser-Zementwert (W/Z) 0,5 angestrebt (300 kg PZ F/m^3), für den Normalbeton (240 kg PZ F/m^3) ein Wert W/Z von 0,75. Die gewählten Zementgehalte entsprechen den Mindestwerten nach DIN 1045 bzw. DIN 4219. Die von den führenden Leichtzuschlagherstellern empfohlenen Mischungszusammensetzungen wurden genau eingehalten. Einzelheiten der Herstellung und Nachbehandlung bis zur Auslagerung sind in /5/ Abschnitt 2.3.1 ausführlich beschrieben.

In den Anlagen 2 bis 5 ist die Zusammensetzung der 4 verschiedenen Betonarten sowie die Entwicklung der Betondruckfestigkeit β_w für jede der 4 Betonarten dargestellt.

2.3.2 Bewehrung

Für die gesamte Bewehrung wurde Rippenstahl BSt 420/500 RU \emptyset 8 mm verwendet. Seine Festigkeitseigenschaften zu Beginn der Auslagerung, die chemische Analyse des Stahls sowie die Kennwerte der Rippung sind in den Tabellen 20, 21 und 22 (Anlage 8) zusammengestellt.

2.4 Umfang der Versuche

Die Anzahl der Versuchskörper und die Entnahmetermine sind in Tabelle 2 angegeben. Zusätzlich zu den im Versuchsplan vom 17.2.1971 vorgesehenen 74 Versuchskörpern in Rheinhausen wurden 8 Versuchskörper in München ausgelagert. Neben der Untersuchung des Einflusses verschiedener Zuschläge (Leichtsand, Natursand, Blähton, Blähschiefer) sollte dadurch der Einfluß unterschiedlicher klimatischer Bedingungen (Lagerungsvariante München) erforscht werden. Zwei der insgesamt 80 hergestellten Versuchskörper konnten wegen Beschädigung beim Transport nicht mehr ausgelagert werden. Statt 8 Versuchskörpern (vgl. Kurzbericht vom 8.10.72, Tabelle 1) kamen deshalb in München nur noch 6 zur Auslagerung. Die ursprünglich vorgesehene Entnahme eines Balkenpaares in München nach 3 Jahren wurde nicht vorgenommen.

Bisher wurden folgende Entnahmen durchgeführt und mit den entsprechenden Versuchsberichten abgeschlossen:

- 1. Entnahme in Rheinhausen im Oktober 1974 nach 3jähriger Auslagerung /6/
- 2. Entnahme in Rheinhausen im Oktober 1977 nach 6jähriger Auslagerung /7/
- 3. Entnahme in Rheinhausen und München im Oktober 1982 nach 11jähriger Auslagerung (vorliegender Bericht).

2.5 Auslagerungsstellen - Lage und klimatische Verhältnisse

2.5.1 Lage zur Wetterrichtung

Die paarweise zusammengespannten Balken liegen mit einer Schmalseite nach oben auf Holzriegeln etwa 50 cm über dem Boden.

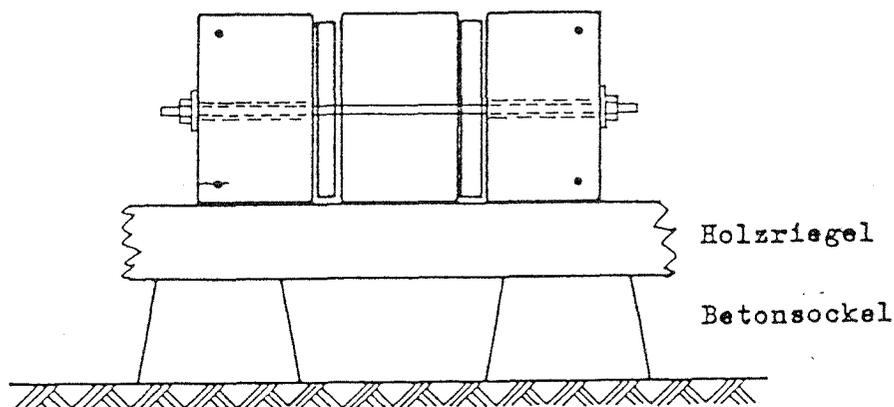


Bild 1: Lage der Balken

2.5.2 Lagerung im Ruhrgebiet (stark verunreinigte Industrieluft)

72 Versuchskörper wurden im Ruhrgebiet auf dem Gelände der Friedrich Krupp-Hüttenwerke in Rheinhausen ausgelagert. Als Lagerplatz dient eine Wiese östlich des Institutsgebäudes der "Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken". In westlicher Richtung (Hauptwindrichtung) liegt in etwa 300 m Entfernung eine Sinteranlage. Im Süden befindet sich im Abstand von ca. 50 m ein Erzlager mit erheblicher Staubeentwicklung, dahinter der Hafen. In östlicher Richtung stehen in etwa 200 m Entfernung Hochöfen. Im Norden grenzt die Werksstraße an den Lagerplatz.

2.5.3 Lagerung in München (normales Großstadtklima)

6 Versuchskörper wurden in München-Freimann auf dem Gelände der Bundesbahn-Versuchsanstalt ausgelagert. Im Osten grenzt eine Baracke an den Lagerplatz, nach allen anderen Richtungen ist er offen.

2.6 Belastung und Auslagerung der Balken

2.6.1 Auslagerungstermine

Die nachfolgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Herstellungs- und Auslagerungstermine der Versuchskörper.

Tabelle 4: Herstellungs- und Auslagerungstermine

Auslagerungsort	Ruhrgebiet	München
Balken hergestellt	Sept. - Nov. 1971	Okt. - Nov. 1971 1 Balkenpaar im April 1972
Balken ausgelagert	Dez. 1971	1 Balkenpaar im August 1972 2 Balkenpaare im Juni 1974

Genauere Zeitangaben über Herstellung, Auslagerung und Entnahme der einzelnen Balken werden in den jeweiligen Entnahmeberichten gemacht. Für die bisher entnommenen Balken enthalten die Anlagen 9 und 10 die entsprechenden Angaben.

2.6.2 Belastung der Balken

Die Balken wurden an die vorgesehenen Auslagerungsorte transportiert und dort jeweils paarweise mit der Zugseite nach außen über ein Zwischenstück mit Schraubenbolzen zusammengespannt (siehe Bild 2). Die Belastung der Balken wurde für eine rechnerische Stahlspannung von $\sigma_{eII} = 400 \text{ N/mm}^2$ unter der Annahme $n = 9$ ermittelt. Die Bolzenkräfte ergaben sich infolge der unterschiedlichen Nutzhöhe verschieden. Sie betragen beim Balkentyp P1 12,2 kN, bei Balkentypen P2 und B1 11,3 kN und beim Balkentyp B2 10,3 kN. Die Spannung der Schraubenbolzen wurde mit Hilfe von Dehnungsmessungen (Meßlänge 13,5 cm) kontrolliert.

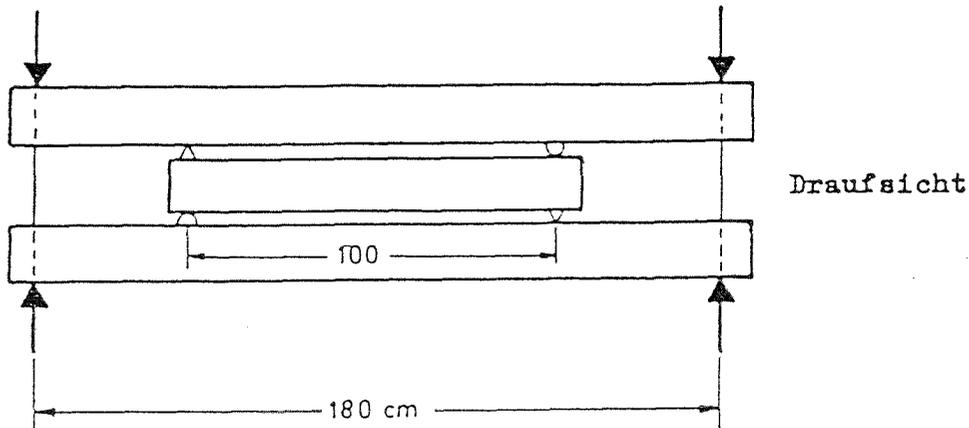


Bild 2: Belastung der Balken bei der Auslagerung
(Einzelheiten siehe Anlage 7)

2.6.3 Messung der Rißbreiten

Die Rißbreite ist als kürzeste Entfernung zwischen zwei Rißufern an der Betonoberfläche definiert.

Nach dem Zusammenspannen der Balken wurden die Rißbreiten jeweils an den Projektionen der Längsstäbe auf die Betonoberflächen gemessen (siehe Bild 3, Ablesestellen I - V). Zur Ausschaltung von Zufälligkeiten wurden jeweils 3 Ablesungen im Abstand von 0,5 cm vorgenommen. Als maßgebende Rißbreite wurde der Mittelwert dieser 3 Einzelablesungen verwendet. Pro Riß ergaben sich somit maximal 13 Einzelablesungen.

Neben der Messung der Rißbreiten wurde noch das Rißbild eines jeden Balkens aufgezeichnet.

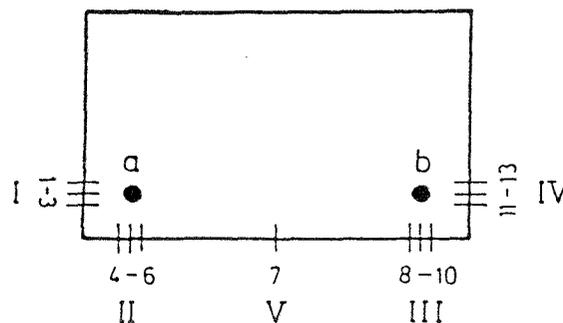


Bild 3: Ablesestellen der Rißbreiten

2.7 Entnahme der Balken

Nach elfjähriger Auslagerung wurden im Oktober 1982 in Rheinhausen 9 Balkenpaare entnommen. Die Anlagen 9 und 10 enthalten die Zeitangaben über Herstellung, Auslagerung und Entnahme dieser Balken.

Die Balken waren bei der Entnahme mit einer braunschwarzen Schmutzschicht überzogen. Sie wurden deshalb vor der Rißbreitenmessung mit Wasser und Bürste gereinigt und die Rißbereiche anschließend mit Preßluft trockengelegt. Somit waren die Kanten der Rißufer, soweit sie nicht bereits zu stark abgewittert waren, bei der anschließenden Rißbreitenablesung gut zu erkennen. Es wurden - soweit erforderlich - die Rißbildaufzeichnungen vom Zeitpunkt der Auslagerung ergänzt und die Rißbreiten entsprechend dem Schema bei der Auslagerung und der ersten Entnahme bestimmt (siehe 2.6.3).

Anschließend wurden durch Dehnungsmessungen an den Spannbolzen vor und nach dem Auseinanderbau die Spannungsverluste - verursacht durch die Kriechdurchbiegung der Balken - ermittelt. Tabelle 5 gibt die Spannungsverluste im Verlauf der elfjährigen Auslagerung wieder.

Tabelle 5: Spannungsverluste /%/ in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer

Betonart	nach 3 Jahren		nach 6 Jahren		nach 11 Jahren	
	%	entnommene Balkenpaare	%	entnommene Balkenpaare	%	entnommene Balkenpaare
L1	50%	3	54%	6	59%	5
L2	33%	1	55%	1	34%	1
L3	37%	1	94%	1	35%	1
N	50%	3	63%	3	49%	3

Es zeigte sich, daß lediglich bei der Betonart L1 ein kontinuierlicher Spannungsabfall auftrat. Bei L2 und L3 wurde deutlich, daß die hohen Spannungsverluste nach 6 Jahren, wie bereits in /7/ festgestellt wurde, nur Ausnahmefälle waren. Bei L2, L3 und Normalbeton entsprach der Spannungsverlust nach 11 Jahren dem nach 3 Jahren. Der Hauptteil der aus dem Kriechen der Betondruckzone und der Relaxation der Bolzen resultierenden Spannungsverluste war also bereits nach 3 Jahren vorhanden.

In ausgebautem Zustand war bei allen Balken noch eine leichte Krümmung der Versuchskörper zu erkennen. Bezogen auf die Verbindungsgerade der Balkenenden betrug die Durchbiegung etwa 5 - 10 mm. Dies ist einerseits zurückzuführen auf das Kriechen der Betondruckzone, andererseits auf die Schmutzablagerungen in den Rissen, die ein Schließen der Rißufer in entspanntem Zustand weitgehend verhinderten.

Die Einzelbalken sowie die dazugehörigen Zwischenstücke und Prüfwürfel wurden zur weiteren Untersuchung nach München ans Institut für Massivbau verfrachtet.

Dort wurden Betondeckung und Karbonatisierungstiefe gemessen und die Bewehrung zur Bestimmung des Korrosionszustandes ausgebaut.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Aussehen der Versuchskörper

Alle Balken waren bei der Entnahme mit einer braunschwarzen Schmutzschicht bedeckt - besonders auf den Auslagerungsobere- und -seitenflächen. An den Betonaußenflächen zeigten sich nur geringe Abwitterungserscheinungen, wobei die oben bzw. unten liegenden Schmalseiten der Balken (beim Betonieren Seitenflächen) stärker verwittert waren. Bei den drei Leichtbetonarten waren die Rißufer meist scharfkantig und wenig beschädigt, während bei den Normalbetonbalken teilweise erhebliche Abwitterungserscheinungen festgestellt wurden.

Die Risse waren mit Schmutzablagerungen verstopft. Diese Verschmutzung reichte in manchen Fällen bis über die Bewehrung ins Innere des Balkens.

Bei den 3 Leichtbetonarten verliefen die Risse durch die Zuschlagkörner; es bildeten sich „glatte“ Rißflächen. Im Normalbeton war dagegen die Zementmatrix gerissen.

Die Spannbolzen waren bei der Auslagerung mit einem Schutzanstrich versehen worden. Bei der Entnahme wiesen die Bolzen zwar Oberflächenrost auf, die Korrosionsabtragung war aber vernachlässigbar gering.

3.2 Rißbreiten

Nach dem Zusammenspannen der Balkenpaare wurde vor der Auslagerung die Rißbreite bestimmt und ihre Lage kartiert. Bei der Entnahme wurden die Rißbreiten erneut abgelesen und das Rißbild - soweit erforderlich - ergänzt. Sämtliche Rißbreiten wurden mit einem Meßmikroskop mit 40facher Vergrößerung abgelesen. Aus den Summenhäufigkeitsdarstellungen (Anlagen 11 und 12) ist die Änderung der Rißbreitenverteilung ersichtlich. In Tabelle 6 werden die mittleren Rißbreiten der einzelnen Balkentypen miteinander verglichen.

Bei der Gegenüberstellung dieser Werte ist zu beachten, daß bei der Messung bei der Entnahme aus folgenden Gründen Ungenauigkeiten auftreten können:

- die Rißkanten waren teilweise stark abgewittert (besonders bei Normalbeton)
- die Verschmutzungen in den Rissen konnten nicht immer ausreichend beseitigt werden.

Tabelle 6: Mittlere Rißbreiten vor und nach der Auslagerung

	P1		P2		B1					B2
	L1	N	L1	N	L1	L1/M	L2	L3	N	L1
W_m^0 (1/100 mm) Rißbreite vor der Auslagerung	13	15	16	19	19	16	18	25	20	34
W_m^{11} (1/100 mm) Rißbreite nach 11jähriger Auslagerung	14	16	17	22	20	18	21	25	24	33
Rißbreiten- änderung nach 11 Jahren	+7%	+6%	+6%	+14%	+5%	+11%	+14%	±0%	+17%	-3%
Anzahl der ge- messenen Riß- stellen vor der Auslagerung	66	27	57	30	54	68	48	36	28	32
nach der Auslagerung	68	28	61	30	57	67	47	41	30	38

Diese Ergebnisse bestätigen die bereits in den Berichten nach drei- und sechsjähriger Auslagerungszeit getroffene Feststellung eines weitgehenden Gleichbleibens der mittleren Rißbreiten.

Die aus Tabelle 6 zu entnehmende Tendenz zu einer geringen Vergrößerung der Rißbreite ist auf die aufgetretenen Kriechverformungen im Beton zurückzuführen, obwohl die beobachtete Bildung, wenn auch weniger, neuer Risse mit geringer Rißbreite den Rechenwert „mittlere Rißbreite“ gegenläufig beeinflusste.

Folglich war die Zunahme der mittleren Rißbreite in der Regel dort am größten, wo die Rißanzahl sich kaum veränderte (P2/N, B1/L1/M, B1/L2, B1/N). Umgekehrt blieb die mittlere Rißbreite dort konstant (B1/L3) oder nahm leicht ab (B2/L1), wo sich die Rißanzahl relativ deutlich vergrößerte.

3.3 Betondeckung

Die Betondeckung der Bewehrung wurde an jeder Rißstelle sowie an jedem Berührungspunkt zwischen Längs- und Querbewehrung bestimmt. Die Tabelle 24 (Anlagen 13 und 14) enthält die Auswertung dieser Meßergebnisse.

3.4 Karbonatisierung

Die Karbonatisierung der Versuchsbalken wurde mit der Farbindikatormethode bestimmt. Wird eine frische Betonbruchfläche mit 0,1%iger äthanolischer Phenolphthaleinlösung besprüht, so färben sich die Stellen mit einem pH-Wert $\geq 9,3$ intensiv rot, während die Lösung bei einem pH-Wert $\leq 8,3$ farblos bleibt. Das Ausbleiben der Rotfärbung besagt, daß an diesen Stellen das Calciumhydroxid, welches die Alkalität im Beton bewirkt, durch Karbonatisierung neutralisiert ist. Die so ermittelte "Karbonatisierungsgrenze" stellt meist keine parallel zur Betonoberfläche verlaufende Trennlinie dar, sondern verläuft aufgrund der Inhomogenität des Betons (Risse, Hohlräume, z.T. dichte und z.T. poröse Zuschlagstoffe, Entmischung) sehr unterschiedlich mit oft tiefen Karbonatisierungsspitzen.

Bild 4 zeigt die Meßstellen für die Messung der Karbonatisierungstiefe am Beispiel des Balkentyps „B“ sowie die Lage der Balken während der Auslagerung.

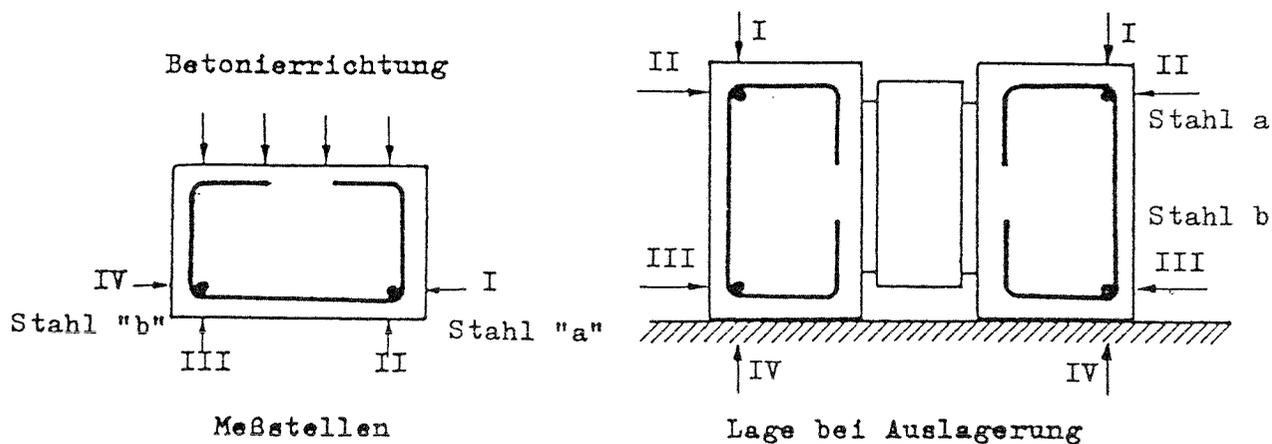


Bild 4: Lage der Meßstellen für die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und Lage der Balken während der Auslagerung

3.4.1 Karbonatisierungstiefe im ungerissenen Beton nach 11jähriger Auslagerung

Da die gemessenen Einzelwerte für die mittlere und für die maximale Karbonatisierungstiefe erheblich schwankten, werden in der folgenden Tabelle stets die oberen und unteren Grenzwerte der einzelnen Messungen angegeben (Tabelle 7, Bild 5 und 6).

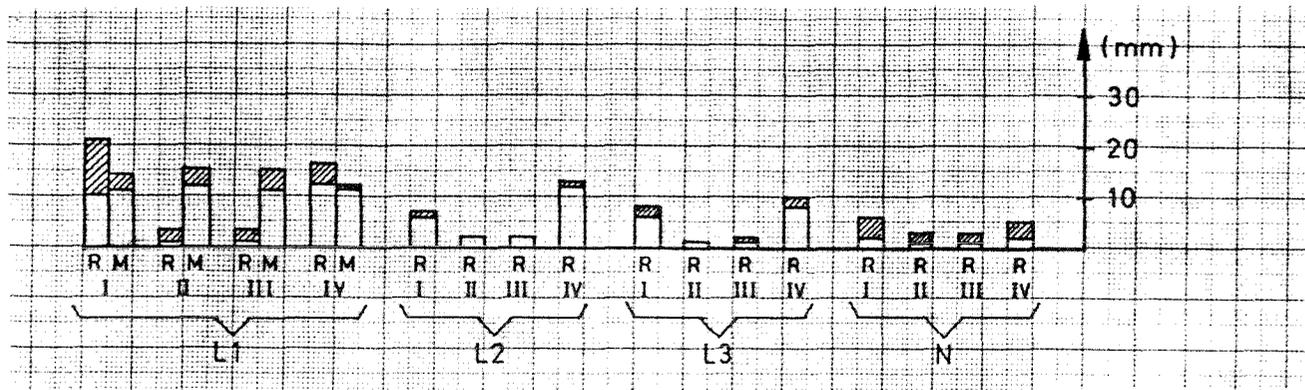
Tabelle 7: Gemessene Karbonatisierungstiefen in /mm/
 (augenscheinlich festgestellte Mittel- und Maximalwerte)

Seite 1)	Beton (Auslagerungsort) ²⁾					
		L1(R)	L1(M)	L2(R)	L3(R)	N(R)
	Balkenanzahl	8	2	2	2	6
Stahl „a“	I : Mittelwert	10-21	11-14	6-7	6-8	2-6
	I : Maximum	20-45	21-25	14-20	14-20	3-12
	II : Mittelwert	1-3	12-15	2	1	1-3
	II : Maximum	2-10	19-20	3-5	2-4	2-8
Stahl „b“	III: Mittelwert	1-3	11-15	2	1-2	1-3
	III: Maximum	2-25	18-21	3-5	2-8	7-13
	IV : Mittelwert	12-16	11-12	12-13	8-10	2-5
	IV : Maximum	19-52	20-27	21-27	16-25	3-13

1) vgl. Bild 4

2) „R“ = Rheinhausen, „M“ = München

Mittlere Karbonatisierungstiefen



Maximale Karbonatisierungstiefen

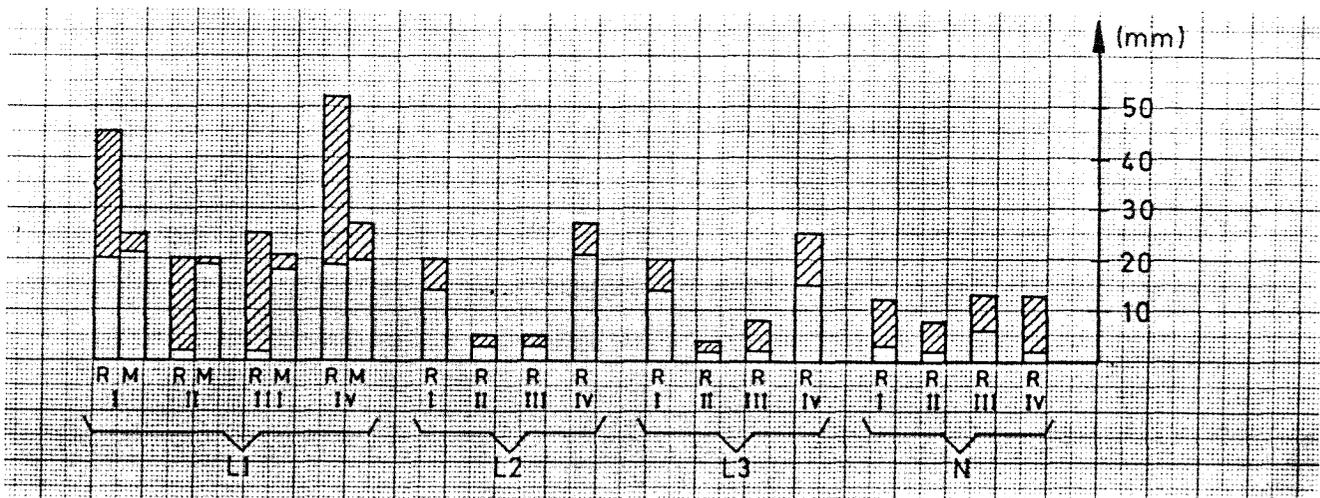


Bild 5: Mittlere und maximale Karbonatisierungstiefen in
Abhängigkeit von Betonart und Auslagerungsort
(R = Rheinhausen, M = München),
Lage der Meßstellen siehe Bild 4

Bevor auf das unterschiedliche Karbonatisierungsverhalten der einzelnen Betonarten eingegangen wird, sollen zwei wesentliche, bei allen Versuchskörpern mehr oder weniger ausgeprägt festzustellende Einflüsse auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit erwähnt werden.

- a) Betonierrichtung: Aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten von Zementmörtel und Zuschlägen beim Leichtbeton sackt der schwere Mörtel beim Betonieren ab und verdrängt den Großteil der leichteren Grobzuschläge nach oben. An der Betonierunterseite bildet sich deshalb eine dichte Oberfläche, die nur sehr langsam karbonatisiert. Durch die Anhäufung der porösen Grobzuschläge bilden sich an der Oberseite große Poren. Poren und Zuschläge erleichtern die Diffusion des Kohlendioxids in den Beton und bewirken dadurch ein rasches Vordringen der Karbonatisierungsfront. Beim Normalbeton tritt dieser Entmischungsvorgang kaum in Erscheinung; deshalb verläuft die Karbonatisierung an allen Seitenflächen gleichmäßiger.
- b) Lage der Versuchskörper während der Auslagerung: Im gut durchfeuchteten Beton ist die Diffusion von Kohlendioxid durch die wassergefüllten Poren von Zementstein und Zuschlag stark behindert. Da die Oberseite der im Freien lagernden Versuchskörper häufiger und intensiver durchfeuchtet wird (Meßstelle I), schreitet dort die Karbonatisierung langsamer fort, als auf der Unterseite (Meßstelle IV).

Bild 6 zeigt eine Darstellung der Karbonatisierungstiefen in den Eckbereichen der Probekörper. Im folgenden wird auf das unterschiedliche Karbonatisierungsverhalten der einzelnen Betonarten genauer eingegangen.

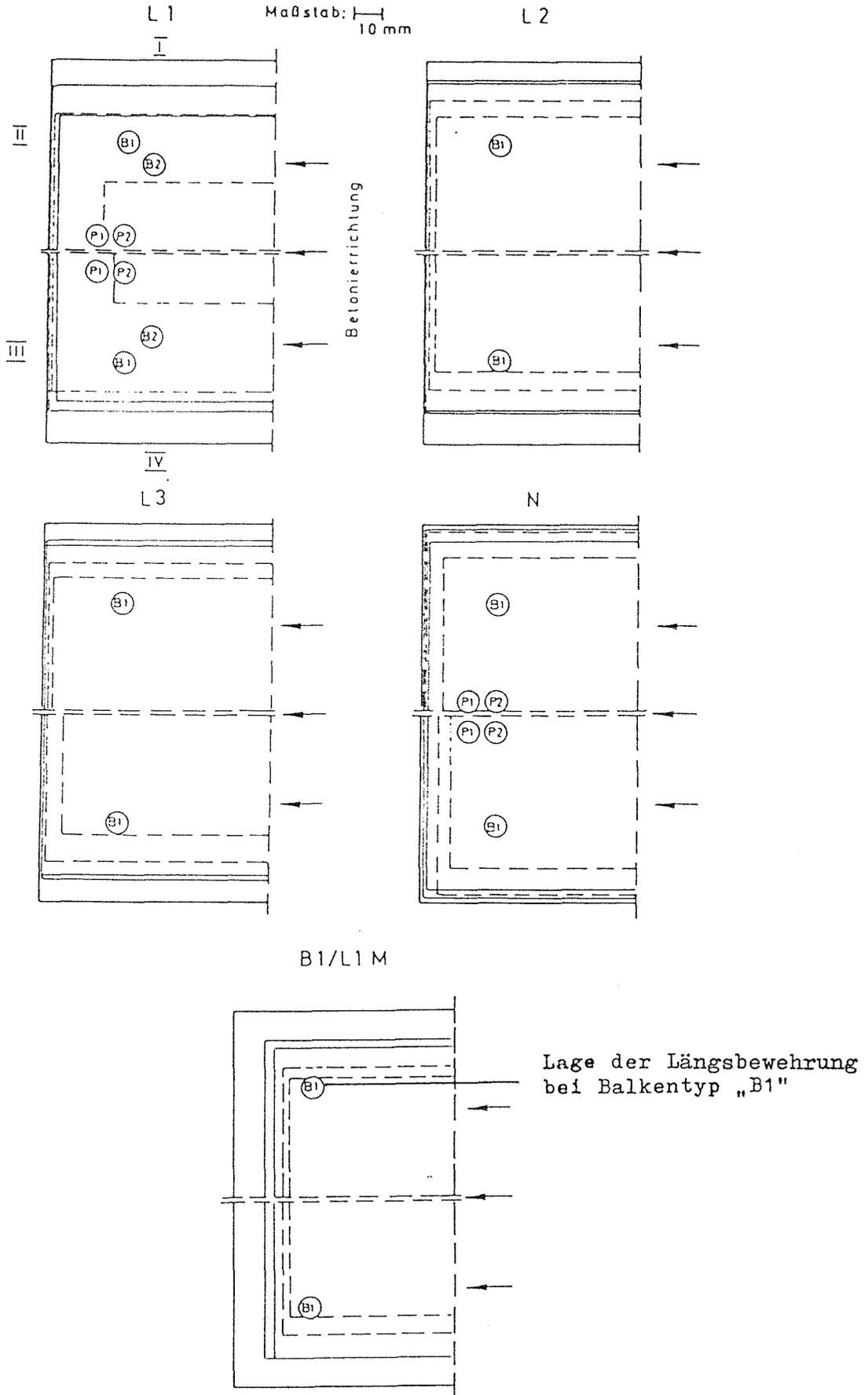


Bild 6: Maßstäbliche Darstellung der Mittel- und Spitzenwerte der Karbonatisierungstiefen in den Eckbereichen der Balkenquerschnitte

Leichtbeton L1

Auslagerungsort Rheinhausen:

Bei der Leichtbetonart L1 wurden mit Abstand die größten Karbonatisierungstiefen gemessen. Bereits bei der Entnahme nach 6jähriger Auslagerungszeit war bei dieser Betonart festgestellt worden, daß die Karbonatisierungsfront in weiten Bereichen die unter 15 mm Betondeckung liegenden Bewehrungsstäbe erreicht hatte. Ursache für die große Karbonatisierungsgeschwindigkeit ist die hohe Porosität des Liapor 5- und des Liasand-Zuschlags. Auffallend sind außerdem die großen maximalen Karbonatisierungstiefen, d.h. die weit über die mittlere Karbonatisierungstiefe ins Betoninnere vordringenden Karbonatisierungsspitzen.

Nur die mittleren Karbonatisierungstiefen an den beim Betonieren unten liegenden Flächen entsprachen den bei den anderen Betonarten (Leichtbeton und Normalbeton) festgestellten Werten. Dies ist eine Folge des beschriebenen Absetzeffekts.

Ein Einfluß der Lage der Versuchskörper hingegen deutete sich nur an. Die Streubereiche der Meßwerte waren im Vergleich zu den anderen Betonsorten erheblich größer, was vermutlich auf die wesentlich größere Anzahl von Versuchskörpern zurückzuführen ist.

Auslagerungsort München:

Im Gegensatz zu den in Rheinhausen gelagerten Balken war die Karbonatisierungstiefe bei den Münchener Balken unabhängig von der Betonierseite rundum etwa gleich. Die Karbonatisierungsspitzen drangen bei den Münchener Balken erheblich weniger weit ins Balkeninnere vor.

Leichtbeton L2 (Blähschiefer und Berwilit-Leichtsand)

Die mittleren Karbonatisierungstiefen waren etwas geringer als beim Leichtbeton L1. Deutlich geringer waren jedoch die Maximalwerte, d.h. die Streuung der Karbonatisierungstiefe war infolge der dichteren Zuschläge bei L2 wesentlich kleiner.

Auf der Betonier-Unterseite waren die Karbonatisierungstiefen (Mittel- und Maximalwerte) wie bei allen Leichtbetonarten etwa gleich groß wie bei Normalbeton (Bild 7).

An den Seitenflächen waren die Werte deutlicher größer als bei Normalbeton. Die tiefsten Karbonatisierungsspitzen reichten bis 27 mm (Bild 8). Dieser Wert ist etwa doppelt so groß, wie der vergleichbare Wert bei Normalbeton.

Ein Einfluß der Orientierung der Außenflächen bei der Auslagerung (oben - unten) war festzustellen. Die mittlere Karbonatisierungstiefe auf der nach oben weisenden Fläche der Balken war nur etwa halb so groß, wie auf der unteren Seite.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß die Verwendung weniger poröser Zuschlagstoffe den Widerstand gegenüber der Karbonatisierung deutlich verbessert.

Dennoch wurde bei einer seitlichen Betondeckung von 2,6 cm (Probekörper Typ B 1) neben der Bügelbewehrung auch die Längsbewehrung vereinzelt von Karbonatisierungsspitzen erreicht (Bild 6 und 8). Dies stellt allerdings einen Ausnahmefall an nur 2 Stellen dar.

Leichtbeton 3 (Liapor 5 und Natursand)

Wie schon nach sechsjähriger Auslagerung entsprachen die Karbonatisierungstiefen denen der Leichtbetonart L2 und damit an den Betonierunterseiten dem Normalbeton. An den Seitenflächen waren sie ungefähr doppelt so groß wie bei Normalbeton.

Die Verwendung vom Natursand beim L3 statt Lia-Leichtsand beim L1 reduzierte die Geschwindigkeit und damit die Tiefe der Karbonatisierung erheblich.

Dennoch wurde, wie bei Leichtbeton L2, seitlich die Bügelbewehrung, von Karbonatisierungsspitzen erreicht. Auch bei der Längsbewehrung war dies an 3 Stellen, an denen die Soll-Betondeckung nicht eingehalten worden war, der Fall.

Normalbeton

An den Betonierunterseiten wurden für Normalbeton etwa gleich große Karbonatisierungstiefen wie bei L2 bzw. L3 festgestellt. Die Mittelwerte betragen etwa 3 mm. Diese Tatsache ist auf den erläuterten Absetzeffekt beim Leichtbeton zurückzuführen.

Im Gegensatz zu den Leichtbetonbalken hatten auch die Karbonatisierungsspitzen die unter 15 mm seitlicher Betondeckung liegende Bügelbewehrung mit einer Ausnahme noch nicht erreicht. Lediglich an einer Stelle mit geringerer Überdeckung (13 mm) wurde Korrosion festgestellt.

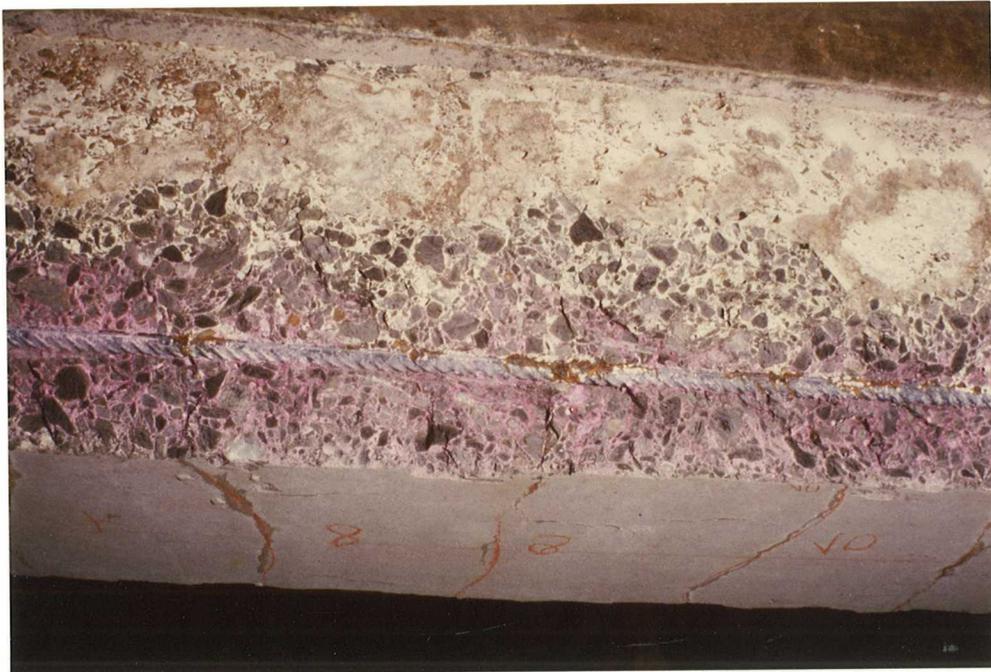


Bild 7: Geringe Karbonatisierungstiefen an der Betonunter-
unterseite des Versuchskörpers B1/L2, 5

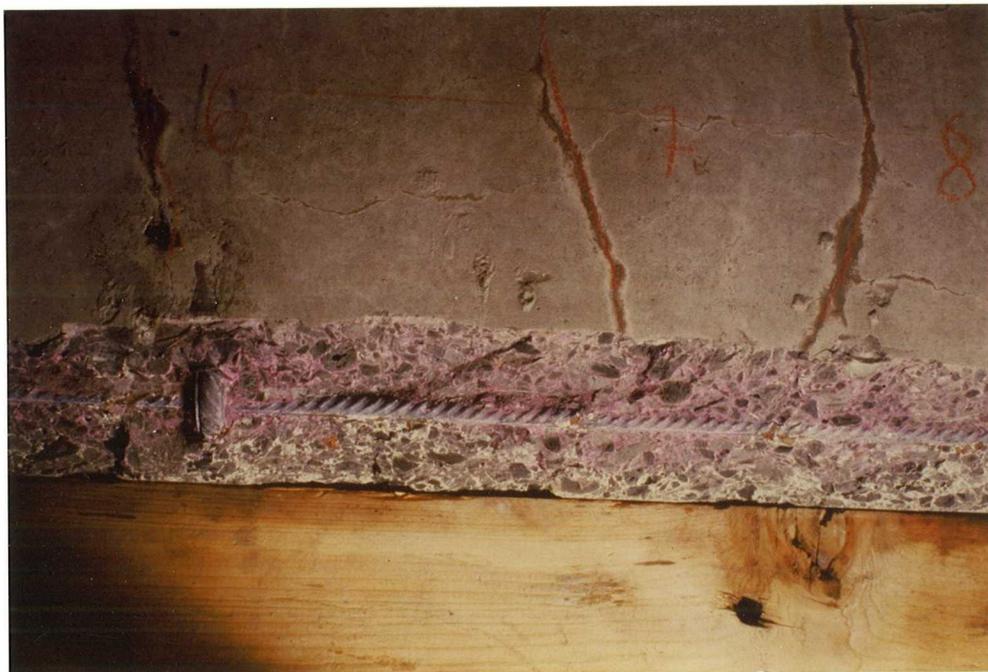


Bild 8: Seitliche Karbonatisierungsspitzen (Auslagerungs-
unterseite) reichen bis an die Bewehrung, Versuchs-
körper B1/L2, 5

3.4.2 Karbonatisierung an Rissen

Voraussetzung für das Auftreten von Korrosion an Rissen ist die Karbonatisierung der Rißufer. Durch die angewandte Farbindikatorprüfung war es jedoch nicht immer und einwandfrei möglich die Karbonatisierungsgrenze in diesen Bereichen zu bestimmen. Die Rißflächen waren bis in mehrere Zentimeter Rißtiefe zum Teil so stark verschmutzt, daß die Färbung zu schwach war, um sicher feststellen zu können, ob und wie weit die Oberfläche der Rißufer karbonatisiert war.

Es war jedoch wie schon bei den ersten beiden Entnahmen zu beobachten, daß die Karbonatisierungsfront in den Rissen im allgemeinen wesentlich weiter ins Betoninnere vorgedrungen war als im ungerissenen Bereich.

3.5 Luftporengehalt und Gasdurchlässigkeit

3.5.1 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt der untersuchten Betonarten wurde näherungsweise über das Wasseraufnahmevermögen unter hohem Druck (150 bar) bestimmt. In Tabelle 8 sind diese Versuchsergebnisse dem Betrag der Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck gegenübergestellt.

Tabelle 8: Wasseraufnahmevermögen als Maßstab für den Luftporengehalt

Betonart	Wasseraufnahme (Gew.-%)	
	atmosph. Druck	150 bar
L1	18,5	36,5
L2	13,1	29,3
L3	19,7	37,8
N	5,4	7,0

Die mit diesem Prüfverfahren bestimmten Luftporengehalte ergeben nur einen Anhaltspunkt für die Gasdurchlässigkeit der verschiedenen Betone. Bei dem Verfahren werden alle zur Schnittfläche der Probe hin geöffneten Poren erfaßt. Dabei kann es sich jedoch auch um Poren handeln, die vor dem Schneiden des Betons allseitig geschlossen waren und demnach für die Gasdiffusion nicht zur Verfügung stehen.

Aus den Meßwerten läßt sich jedoch ersehen, daß der Luftporengehalt der Leichtbetone erheblich größer ist als der des Normalbetons. Auch der Ersatz des Leichtsand es durch Natursand (L3) beeinflußt diese Tatsache nicht, da offenbar der wesentliche Porenanteil von den Grobzuschlägen herrührt.

3.5.2 Gasdurchlässigkeit

Bei der Messung der Gasdurchlässigkeit wird in einer Betonprobe ein konstantes Druckgefälle erzeugt. Gemessen wird die Gasmenge, die in einem bestimmten Zeitintervall die Probe durchströmt. Die Maßeinheit ist Perm (Pm). Ein poriger Körper hat die Gasdurchlässigkeit 1 Perm, wenn in 1 Sekunde 1 cm³ eines Gases mit der Zähigkeit 1 Poise (0,1 Ns/m²) unter einem Druckgefälle von 1 dyn/cm durch einen Querschnitt von 1 cm² strömt.

Die Messungen wurden mit einer an unserem Institut entwickelten Apparatur durchgeführt. Als Prüfgas diente Stickstoff unter einem Druck von 133,3 hPa (100 Torr). Die Meßwerte sind in Tabelle 9 zusammengefaßt. Es wurden je Betonart Proben aus dem karbonatisierten Randbereich und dem inneren, noch alkalischen Bereich der Versuchskörper geprüft.

Tabelle 9: Gasdurchlässigkeit der Betone

Betonart	Gasdurchlässigkeit (pPm)	
	innen	außen
L1	3,06 ± 0,01	3,70 ± 2,30
L2	1,20 ± 0,10	1,07 ± 0,60
L3	1,36 ± 0,03	1,41 ± 0,03
N	1,02 ± 0,20	0,84 ± 0,07

Diese Ergebnisse bestätigen die in 3.4 erläuterten Meßwerte der Karbonatisierungstiefen. Die Leichtbetonarten L2 und L3 unterscheiden sich auch in der Gasdurchlässigkeit wesentlich weniger vom Normalbeton als dies bei Leichtbeton L1 der Fall ist.

Im Gegensatz zur Bestimmung des Luftporengehalts mit der Wassereindringmethode ergibt die Gasdurchlässigkeitsprüfung einen besseren Zusammenhang mit den beobachteten Karbonatisierungstiefen. Die geschlossenen, für die Diffusion (von N_2 bzw. CO_2) nicht zur Verfügung stehenden Poren, werden bei diesem Prüfverfahren praxisentsprechend nicht erfaßt.

3.6 Festgestellte Korrosionshäufigkeit

In diesem Abschnitt wird nur die Häufigkeit der Korrosion behandelt, nicht aber deren jeweilige Intensität. Die Art, das Ausmaß und die Auswirkungen der Korrosion werden in Kapitel 4 dargestellt.

Im folgenden werden die Einflüsse

- Betonart
- Versuchskörperart, Betondeckung, Querbewehrung
- Rißbreiten und
- Auslagerungsort

auf die Häufigkeit der Korrosion untersucht.

Die entsprechenden Aussagen ergeben sich aus dem Vergleich der entnommenen Versuchskörper, deren wesentliche Daten in der Tabelle 3 (Seite 5) zusammengestellt sind.

Wegen der großen Streuungen der Beobachtungsergebnisse lassen sich auch nach 11jähriger Auslagerungszeit nur qualitative Aussagen über die einzelnen Einflüsse machen. Die Ergebnisse lassen zwar Tendenzen erkennen, vielfach muß jedoch angenommen werden, daß vom Versuchsprogramm unabhängige und kaum erfaßbare Einflüsse, wie z.B. Schmutzablagerungen oder unterschiedliche Feuchtigkeitsverhältnisse in den Rissen die Einflüsse der Versuchsparameter überdecken. Die Einflüsse der einzelnen Parameter können nur voneinander getrennt werden, wenn die jeweils nicht betrachteten Parameter konstant gehalten werden.

3.6.1 Korrosionshäufigkeit der Längsbewehrung an Rißstellen

Die Häufigkeit der an der Längsbewehrung an Rißstellen gefundenen Korrosion ist in Tabelle 25 (Anlage 15) für jede Versuchskrperart angegeben. Bei dieser Auswertung ist die Breite der Risse nicht berücksichtigt. Die Abhängigkeit von der Rißbreite ist in den Bildern 52 bis 61 (Anlagen 16 - 18) dargestellt.

Der Einfluß der Betonart auf die Korrosionshäufigkeit zeigt sich bei einem Vergleich der Beobachtungen an Versuchskörpern des gleichen Typs (jeweils gleiche Betondeckung).

Klammert man zunächst den Einfluß der Rißbreite aus, so ergeben sich die in Tabelle 25 (Anlage 15) zusammengestellten Korrosionshufigkeiten.

Es zeigt sich, daß eine Betondeckung von 1,5 cm (Versuchskörper P1) unabhängig von der Betonart sowohl bei Leichtbeton, wie auch bei Normalbeton zu einer Korrosionshäufigkeit von 100 % führt. Bei einer Betondeckung von 2,5 cm (Versuchskörper P2 und B1) nimmt die Korrosionshäufigkeit bei Normalbeton auf 75 % ab. Bei den Leichtbetonen beträgt jedoch auch bei einer Betondeckung von 3,5 cm (Versuchskörper B2) die Korrosionshäufigkeit noch mindestens 80 %.

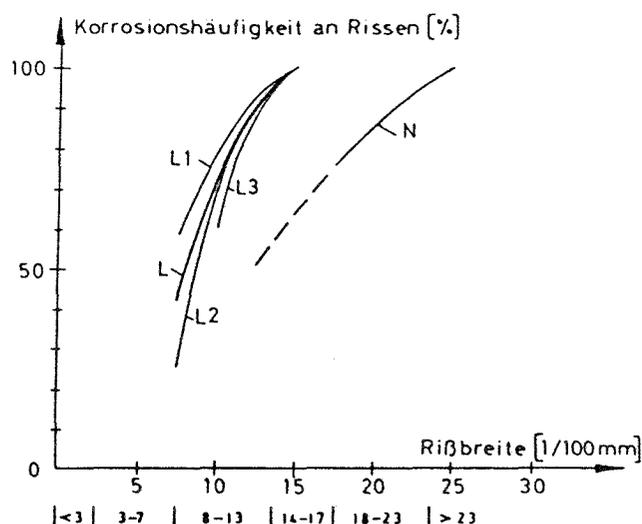


Bild 9: Einfluß der Betonart in Abhängigkeit von der Rißbreite auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen; Versuchskörper Balken B1 (2,5 cm Betondeckung)

Um die Ergebnisse besser differenzieren zu können, muß der Einfluß der Rißbreite ebenfalls berücksichtigt werden. Bild 9 zeigt, daß die Korrosionshäufigkeit bei Leichtbeton stets größer ist als bei Normalbeton, solange die Risse nicht breiter sind als 0,25 mm. Bei größeren Rißbreiten beträgt die Korrosionshäufigkeit sowohl für Leichtbeton, wie auch für Normalbeton 100 %. Bild 9 zeigt außerdem, daß sich die drei verwendeten Leichtbetonarten hinsichtlich der Korrosionshäufigkeit an Rissen nicht wesentlich unterscheiden. Gegenüber den Ergebnissen nach 6jähriger Auslagerung nahm die Korrosionshäufigkeit an Rissen im Mittel für alle Betonarten und Betondeckungen in gleichem Maße, nämlich um etwa 10 %, zu.

Der Einfluß der Versuchskörper zeigt sich bei einem Vergleich des Balkentyps B1 mit dem Plattentyp P2 aus Leichtbeton L1 bzw. Normalbeton (Bild 12b), da die Betondeckung der Längsbewehrung in beiden Fällen gleich groß war. Das der Tendenz nach günstigere Verhalten des Plattentyps ist auf die, im Gegensatz zum Balkentyp, innenliegende Querbewehrung zurückzuführen. Eine Bügelbewehrung dagegen vermindert die wirksame Betondeckung der Längsbewehrung.

Der Einfluß der Betondeckung auf die Korrosionshäufigkeit an Rißstellen zeigt sich bei einem Vergleich der Versuchskörpertypen P1 (c=1,5 cm) mit P2, B1 (c=2,5 cm) und B2 (c=3,5 cm) (Bild 10).

Dabei ist es erforderlich, den Vergleich für ein einheitliches Rißbreitenintervall durchzuführen, da die mittleren Rißbreiten je nach Versuchskörpertyp in Abhängigkeit von der Betondeckung sehr unterschiedlich sind.

Für die Darstellung in Bild 10 wurde ein Intervall mittlerer Rißbreiten, nämlich $w = 0,14$ bis $0,23$ mm gewählt. Dafür zeigte sich, das auch aus Tabelle 25 (Anlage 15) abgebildete Ergebnis: Bei allen Leichtbetonen betrug die Korrosionshäufigkeit im Bereich der Betondeckung von 1,5 bis 3,6 stets etwa 100 %. Bei gleichzeitiger Beschränkung der Rißbreite hat die Betondeckung jedoch einen positiven Einfluß auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen.

Beim Normalbeton bewirkte die Vergrößerung der Betondeckung von 1,5 auf 2,5 cm eine Abnahme der Korrosionshäufigkeit von 100 auf 80 %.

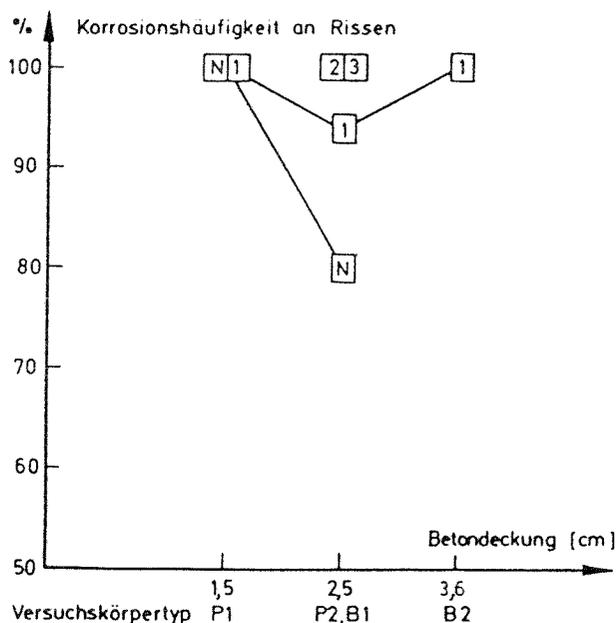


Bild 10: Einfluß der Betonart und des Versuchskörpertyps (Betondeckung, Lage der Querbewehrung) auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen mittlerer Breite ($w = 0,14 - 0,23$ mm)

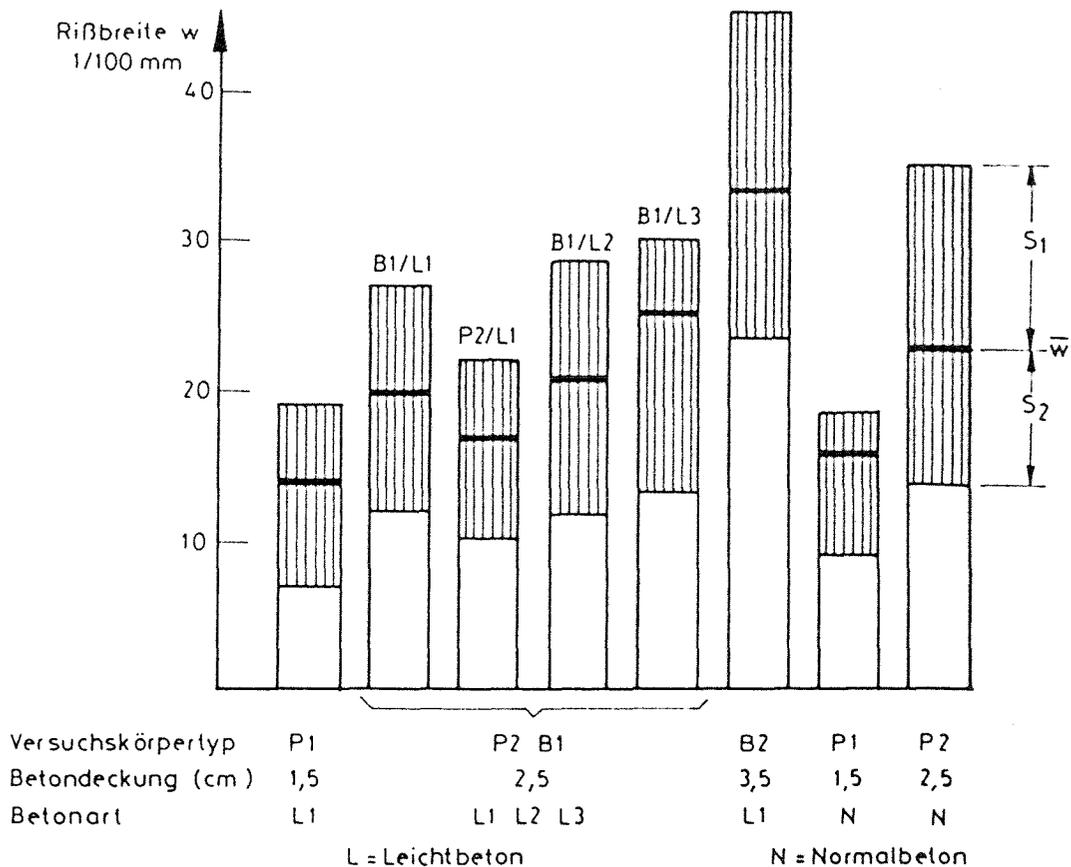
Ein Einfluß der Querbewehrung auf die Korrosionshäufigkeit an Rißstellen war erkennbar. Wenn ein Querbewehrungsstab im Rißquerschnitt lag, war mit Ausnahme zweier Probekörpertypen an allen solchen Rissen Korrosion entstanden (Tabelle 25, Anlage 15). Bei den Ausnahmefällen kann aufgrund der geringen Anzahl der Meßstellen von gleichem Korrosionsverhalten an der Querbewehrung ausgegangen werden.

Der Einfluß der Rißbreite wurde schon als wesentlich herausgestellt. Wegen der unterschiedlichen Betondeckungen waren auch die Streubänder der Rißbreiten sehr unterschiedlich, so daß der direkte Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Versuchskörpertypen zu Fehlschlüssen führen würde. Die Abhängigkeit der Rißbreiten von den Versuchskörpern zeigt Bild 11.

Dabei wird deutlich:

- Die Vergrößerung der Betondeckung um 1 cm bewirkt bei Leichtbeton und kleiner Betondeckung eine Zunahme der mittleren Rißbreite um ca. 20%, bei großer Betondeckung um ca. 70%, bei Normalbeton und kleiner Betondeckung um ca. 50%. Dies ist auf die, von der Betonart und der Betondeckung abhängige, Anzahl der gebildeten Risse zurückzuführen.

- Die mittleren Rißbreiten bei gleicher Betondeckung ($c = 2,5 \text{ cm}$) sind bei Leichtbeton L1 um 20 %, bei Leichtbeton L2 um 15 % kleiner als bei Normalbeton und bei Leichtbeton L3 gleich groß wie bei Normalbeton.



S_1, S_2 : Näherungswerte für 16%- und 84%-Fraktilen
 aus Anlagen 11 und 12

Bild 11: Rißbreiten der verschiedenen Versuchskörpertypen
 und Betonarten

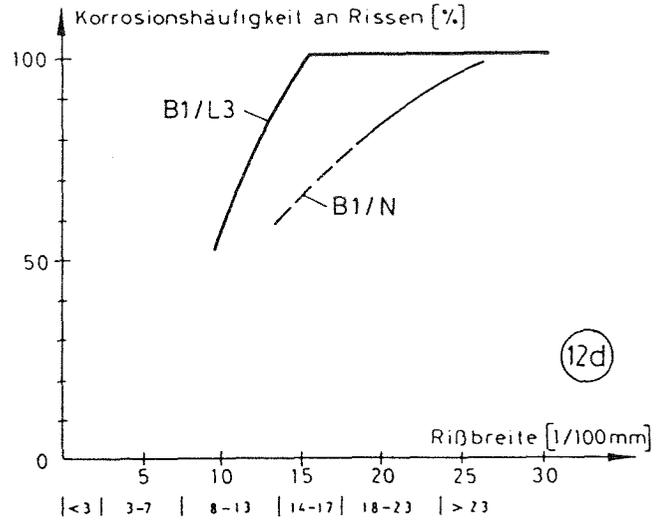
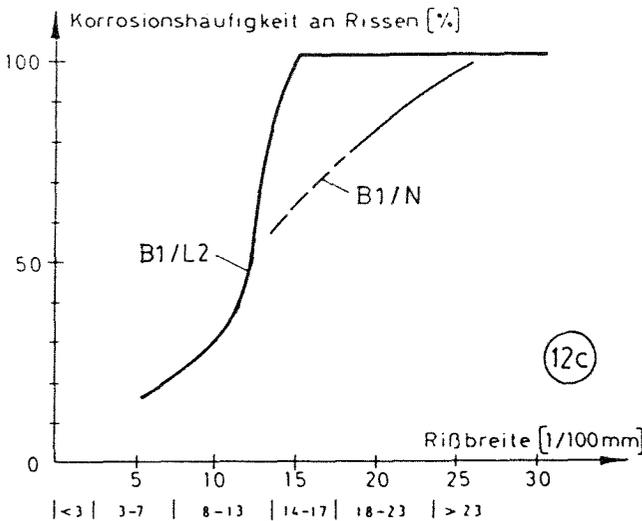
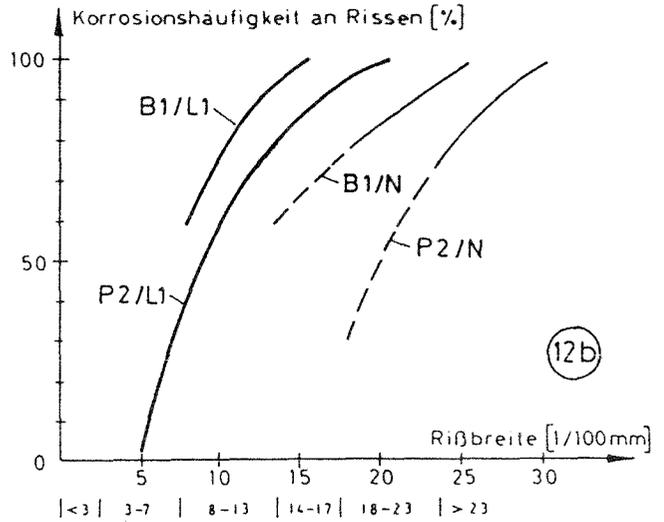
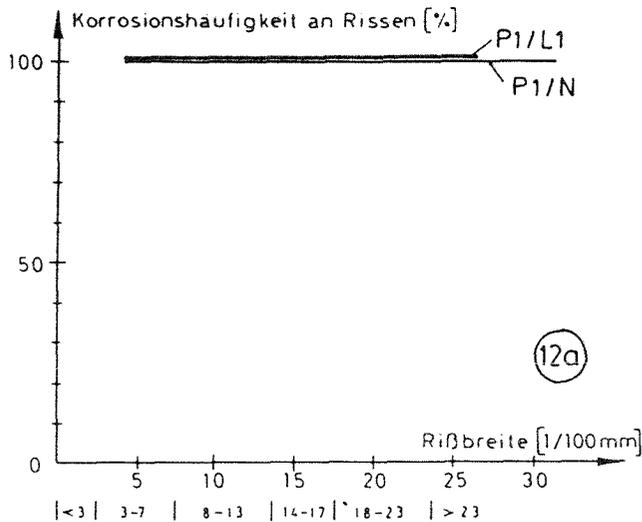


Bild 12: Korrosionshäufigkeit in Abhängigkeit von der Rißbreite für gleiche Betondeckungen

- a: Versuchs körpertyp P1 ($c = 1,5 \text{ cm}$), Betone L1, N
- b: Versuchs körpertyp P2 ($c = 2,5 \text{ cm}$), Betone L1, N
 B1 ($c = 2,5 \text{ cm}$), Betone L1, N
- c: Versuchs körpertyp B1 ($c = 2,5 \text{ cm}$), Betone L2, N
- d: Versuchs körpertyp B1 ($c = 1,5 \text{ cm}$), Betone L3, N

Die Bilder 12a bis d zeigen die Korrosionshäufigkeit bei den verwendeten Leichtbetonarten im Vergleich zum Normalbeton. Bild 12a ist zu entnehmen, daß eine Betondeckung von nur 1,5 cm sowohl bei Leichtbeton L1, wie auch bei Normalbeton unabhängig von der Rißbreite stets zur Korrosion an allen Rissen führte.

Aus den Bildern 12b (L1), 12c (L2) und 12d (L3) folgt, daß die Korrosionshäufigkeit beim Leichtbeton stets deutlich höher war als bei Normalbeton, wenn die übrigen Parameter, Betondeckung und Rißbreite, gleich waren.

Bei der Beurteilung der Korrosionshäufigkeit muß berücksichtigt werden, daß sich die Lebensdauer der Balken in zwei Abschnitte teilen läßt:

- Abschnitt A: Karbonatisierungsphase, Stahl passiv
- Abschnitt B: Karbonatisierungsfront am Stahl, Stahl depassiviert.

Der Zustand zum Zeitpunkt einer Entnahme von Balken ist stets eine Momentaufnahme, deren Bild von der Dauer des Abschnitts A abhängig ist. Erst wenn die Karbonatisierungsfront im Riß die Stahloberfläche erreicht, kann dieser depassiviert werden, d.h. erst dann kann Korrosion einsetzen. Die Korrosionsphase (Abschnitt B) bewirkt dann den im folgenden Summenhäufigkeitsdiagramm schematisch gezeigten Fortschritt der Korrosionshäufigkeit. Die Korrosion beginnt am Anfang der Auslagerung bei den breitesten Rissen und erfaßt im Lauf der Auslagerung auch die schmäleren Risse.

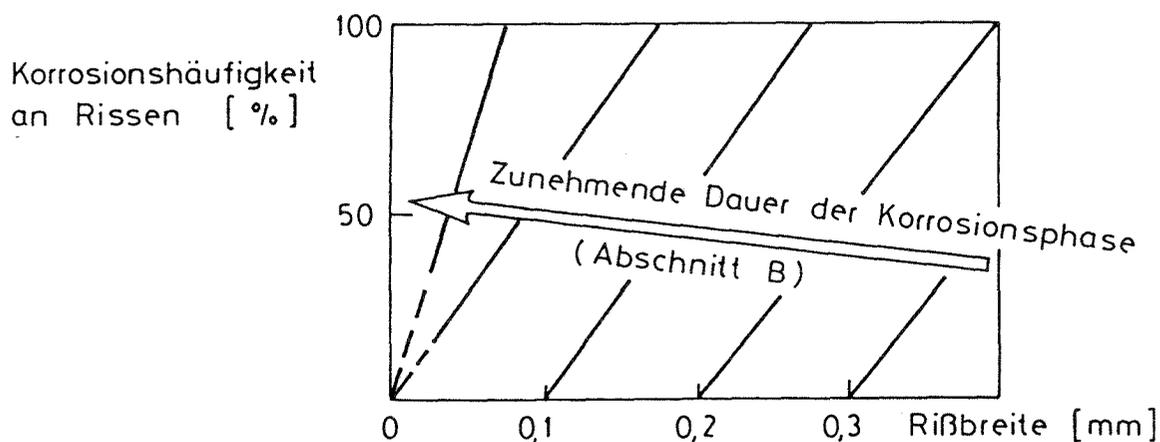


Bild 13: Schematischer Zusammenhang zwischen Korrosionshäufigkeit und Auslagerungsdauer

- Die Dauer des Abschnitts A hängt in erster Linie ab von
- der Größe der Betondeckung
 - dem Zementgehalt des Betons

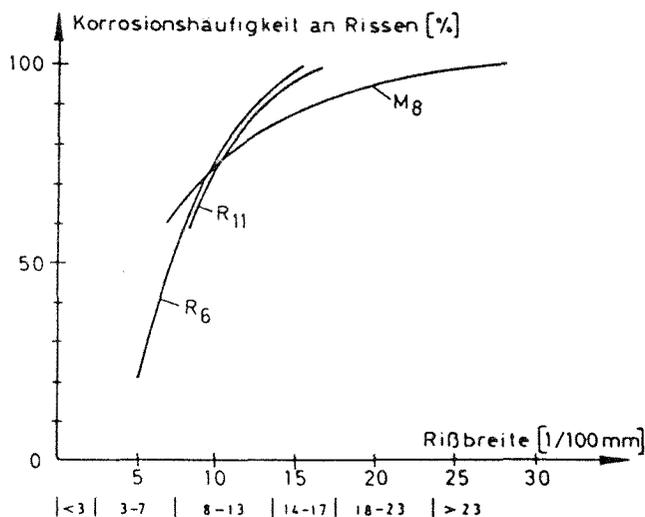


Bild 14: Einfluß der Rißbreite und des Auslagerungsorts auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen Versuchskörper B1/L1

- R₆ Auslagerungsort Rheinhausen (6 Jahre)
R₁₁ Auslagerungsort Rheinhausen (11 Jahre)
M₈ Auslagerungsort München (8 Jahre)

Der Einfluß des Auslagerungsorts auf die Korrosionshäufigkeit an Rißstellen zeigt sich in Bild 14. In das Diagramm wurde zum Vergleich auch der Verlauf eingetragen, der sich bei der Entnahme nach 6 Jahren ergeben hatte.

Es zeigt sich, daß die wesentlich stärkere Verschmutzung der in Rheinhausen ausgelagerten Versuchskörper, zumindest bei Rißbreiten größer als ca. 0,15 mm, die Bildung von Korrosion durch die Verstopfung der Risse nicht verhinderte, sondern daß hier die aggressiveren atmosphärischen Bedingungen an allen Rissen zu Korrosion führten.

Bemerkenswert ist der sehr ähnliche Verlauf der Ausgleichskurven der Entnahme nach 6 und 11 Jahren. Die Auslagerungszeit hatte also zumindest in diesem Zeitraum bei dem vorliegenden Versuchskörpertyp keinen Einfluß mehr auf die Korrosionshäufigkeit an Rissen.

3.6.2 Korrosionshäufigkeit der Längsbewehrung im ungerissenen Beton

Als Korrosionsstellen im ungerissenen Beton werden Korrosionsstellen definiert, die keine Verbindung zu Korrosion an Rissen aufweisen.

Da Korrosion nur in karbonatisierten Bereichen auftreten kann, mußte sich neben dem Einfluß der Betonart in erster Linie der Einfluß der Betondeckung zeigen. Dies bestätigte sich, da mit Ausnahme von Typ B2 (Betondeckung 3,6 cm) an allen Versuchskörpern der Leichtbetonarten Korrosion festgestellt wurde. Bei Normalbeton zeigte sich nur eine Roststelle bei einem Versuchskörper P1 mit der geringsten Betondeckung der Längsbewehrung ($c = 1,5$ cm).

Die Häufigkeit der Korrosion und die jeweils stärksten beobachteten Rostgrade sind Tabelle 10 zu entnehmen. Die Rostgrade Ro1 - Ro4 werden in Abschnitt 4.1 definiert. Sie beschreiben die augenscheinliche Intensität der Korrosion von

- Rostgrad Ro1, schwacher Oberflächenrost, bis
- Rostgrad Ro4, starker Rostangriff mit Bildung von Rostabblätterungen und Lochfraß.

Versuchskörper P1 (Betondeckung $c = 1,5$ cm)

Es wurde an beiden Balken der Leichtbetonart L1 an insgesamt 16 Stellen Korrosion gefunden. Neben den Rostgraden Ro1 und Ro2 war bei L1 an einer Stelle auch Rostgrad Ro4 vorhanden. Demgegenüber wies die Bewehrung bei Normalbeton nur an einer Stelle Rost, Rostgrad Ro1, auf. Die Ausdehnung der Korrosion in Längsrichtung betrug bei L1 0,5 - 3,0 cm. Sie erstreckte sich über 5 % bis 30 %, in einem Fall über 50 % des Stabumfangs.

Versuchskörper P2 (Betondeckung $c = 2,5$ cm)

Bei diesem Versuchskörpertyp waren bei Leichtbeton L1 nur zwei Korrosionsstellen, Rostgrad Ro1 über 10 % bzw. 20 % des Stabumfangs und 1 cm Länge vorhanden.

Es zeigte sich also eine deutliche Verringerung der Korrosionshäufigkeit bei der Vergrößerung der Betondeckung um 1,0 cm.

Bei Normalbeton war die Bewehrung nirgends korrodiert.

Tabelle 10: Häufigkeit der Korrosion an der Längsbewehrung im ungerissenen Bereich

Bezeichnung		Stahl	Anzahl Roststellen	Beton- deckung /cm/	stärkster Rostgrad			
					Ro1	Ro2	Ro3	Ro4
P1	L1/5	a	4	1,8	2	2	-	-
		b	5	2,0	3	2	-	-
	/6	a	2	1,6	1	-	-	1
		b	5	1,9	3	2	-	-
	N/3	b	1	1,7	1	-	-	-
P2	L1/5	a	1	2,3	1	-	-	-
	/6	b	1	3,1	1	-	-	-
B1	L1/9	b	10	3,1	6	2	2	-
		a	1	3,0	-	1	-	-
	/10	b	3	3,0	-	3	-	-
		a	1	3,0	-	1	-	-
	L1M/7	a	1	3,0	-	1	-	-
	/8	a	1	2,2	-	1	-	-
		b	1	2,7	1	-	-	-
L2/5	b	2	3,2	1	-	-	1	
L3/6	b	3	2,9	2	1	-	-	
B2	-	-	-	-	-	-	-	-

Versuchskörper B1 (Betondeckung $c = 2,5$ cm)

Bei diesem Versuchskörpertyp ergab sich eine deutlich geringere Korrosionshäufigkeit bei Leichtbeton L2 und L3 gegenüber Leichtbeton L1:

- Leichtbeton L1 (Auslagerungsort Rheinhausen): 13 Roststellen Rostgrade Ro1 bis Ro3 über 5 % bis 20 % des Stabumfangs und 0,5 bis 4,0 cm Länge.

- Die in München ausgelagerten Balken der Leichtbetonart L1 zeigten, hauptsächlich wohl infolge der um drei Jahre kürzeren Versuchsdauer, nur drei Roststellen, Rostgrade Ro1 und Ro2 über 20 % bzw. 25 % und 0,5 bis 3 cm Länge.
- Leichtbeton L2: zwei Korrosionsstellen, wobei jedoch neben Rostgrad Ro1, über 50 % des Stabumfangs und 2 cm Länge, auch Rostgrad Ro4, über 15 % des Umfangs und 2 cm Länge, festgestellt wurde (vgl. Bild 7 und 8).
- Leichtbeton L3: drei Roststellen, Rostgrade Ro1 und Ro2 über 10 % bzw. 15 % des Umfangs und 1 bzw. 2 cm Länge, nur mittlere Korrosionserscheinungen.

Versuchskörper B2 (Betondeckung $c = 3,5$ cm)

Es wurde keine Korrosion festgestellt, obwohl seitlich Karbonatisierungsspitzen die Bewehrung schon erreicht hatten. Auch hier bestätigt sich der sehr deutliche Einfluß der Vergrößerung der Betondeckung um 1,0 cm.

Korrosion an den Stabenden

Bei allen Versuchskörpern waren die Bewehrungsstäbe an den Enden, die ungeschützt aus den Endflächen der Betonkörper ragten, korrodiert. Die Korrosion war im allgemeinen über eine Länge von wenigen Zentimetern ins Betoninnere vorgedrungen. Beim Vergleich der Betonarten ergaben sich bei Leichtbeton L1 größere Eindringtiefen. Eine Übersicht über die vorgefundene Korrosion gibt die folgende Tabelle 11.

Tabelle 11: Korrosion an den Stabenden

Betonart	Korrodierte Stablänge innerhalb des Betons /cm/	Korrodiertes Anteil des Stabumfangs /%/	Anteil des Rostgrads Ro4 /%/
L1	1 - 6	98	78
L1M	1 - 7	94	75
L2	0,5 - 4	86	50
L3	0,5 - 3	91	63
N	1 - 4	97	75

3.6.3 Korrosionshäufigkeit an den Bügeln und Querstäben

Die Anzahl der Korrosionsstellen ist in Tabelle 26 (Anlage 19) in Abhängigkeit von der Betonart und der Balkenart jeweils für die Rißstellen und für ungerissene Betonbereiche angegeben.

Bild 15 zeigt die Einflüsse der Parameter

- Betondeckung und
- Betonart

auf die Häufigkeit von Korrosionsstellen an der Querbewehrung an Rissen und in ungerissenen Bereichen.

Korrosion am Stahl setzt im vorliegenden Fall voraus, daß die Karbonatisierungsfront den Stahl zumindest stellenweise erreicht hat.

Die Bilder 15b, 15d und 15f zeigen für einzelne Varianten eine Korrosionshäufigkeit gleich oder nahe Null an. Es kann angenommen werden, daß in diesen Fällen die Karbonatisierungsfront noch an keiner Stelle die Stahloberfläche erreicht hatte.

Die in den Bildern 15 angegebenen Betondeckungen beziehen sich auf die Querbewehrung, so daß wegen der Lage der Querbewehrung innen oder außen eine andere Reihenfolge der Versuchskörpertypen entsteht als z.B. in Bild 10, wo die Betondeckung der Längsbewehrung angegeben ist.

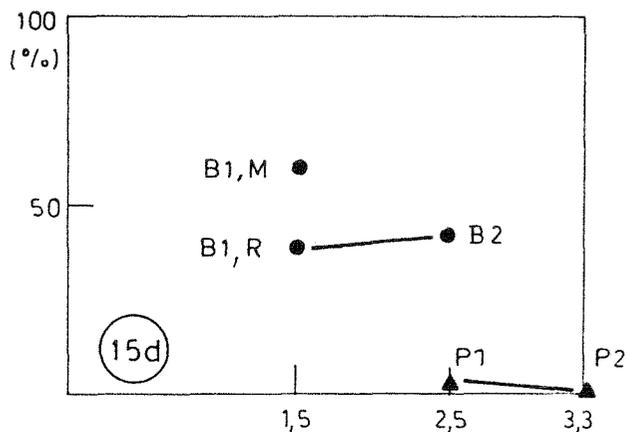
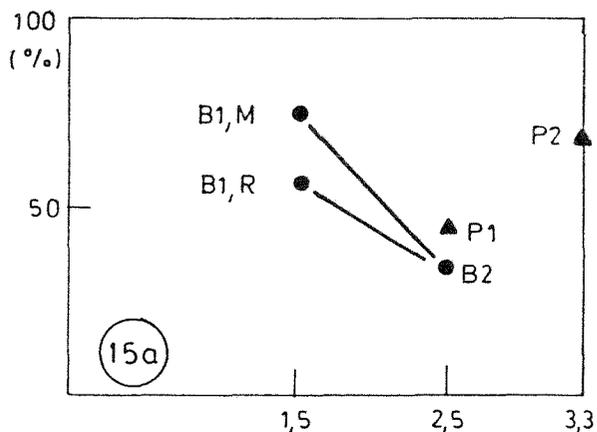
Der Einfluß der Betondeckung läßt sich aus den Bildern 15a, 15c und 15d ablesen. Es zeigt sich, daß die Vergrößerung der Betondeckung um 1 cm im allgemeinen einen Rückgang der Korrosionshäufigkeit um 30 % verursachte. Bei der zahlenmäßigen Bewertung dieses Ergebnisses ist zu berücksichtigen, daß dieser Wert für eine Auslagerungsdauer von 11 Jahren gilt und daß er sich in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer ändert. Mit zunehmender Auslagerungsdauer muß der Einfluß der Betondeckung abnehmen, wenn man voraussetzt, daß die Karbonatisierungsfront stets die Stahloberfläche erreicht. Dies kann jedoch ohne wesentliche Einschränkungen (abhängig von der Betonart und dem Zementgehalt) nur für die Verhältnisse an Rissen angenommen werden.

Bild 15: Korrosionshäufigkeit an der Querbewehrung

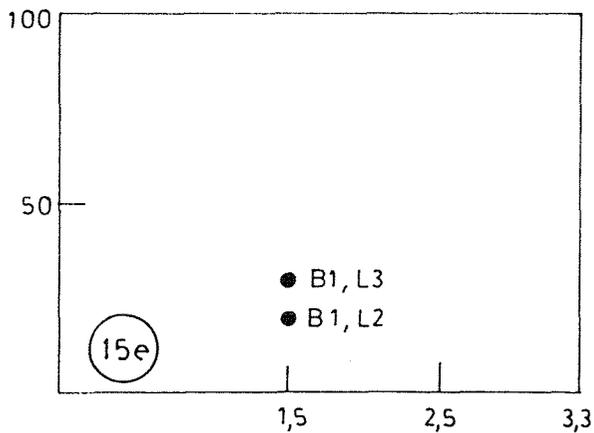
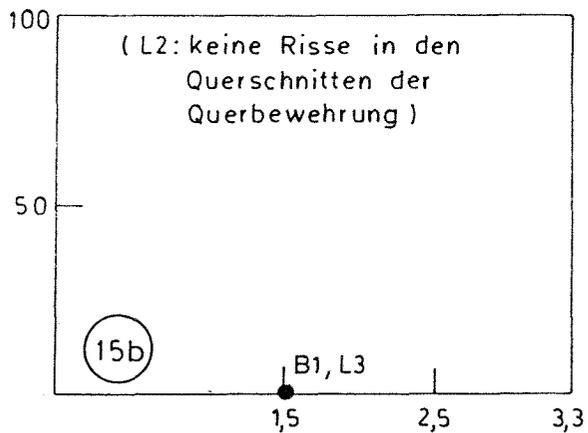
an Rissen

im ungerissenen Bereich

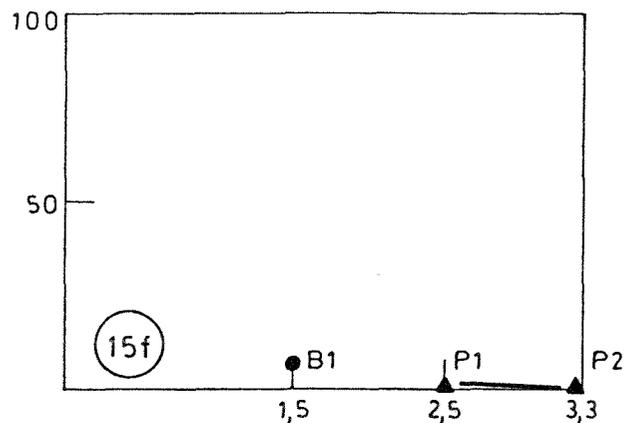
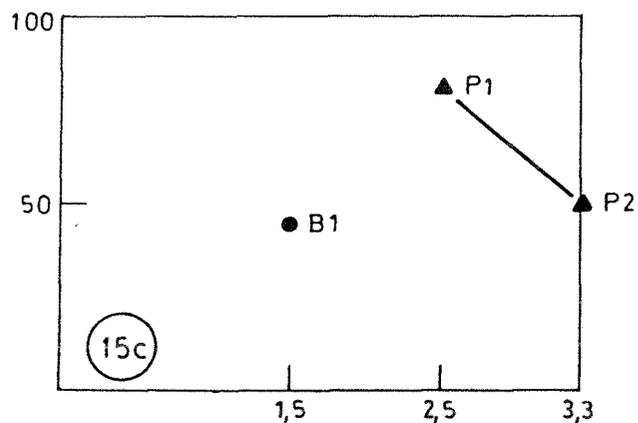
Leichtbeton L1



Leichtbeton L2 und L3



Normalbeton



Der Einfluß der Betonart läßt sich durch Vergleich der Bilder 15a bis 15c bzw. 15d bis 15f erkennen. Vereinfachend kann für Leichtbeton L1 (Liapor) die größte und für Normalbeton die geringste Korrosionshäufigkeit angenommen werden, auch wenn die Ergebnisse in Bild 15b (Leichtbeton L3) und 15c (Normalbeton, Versuchskörpertyp P) von dieser Tendenz abweichen.

3.6.4 Korrosionshäufigkeit an der Bewehrung der Zwischenstücke

Die Bewehrungsstäbe in den Zwischenstücken besaßen eine Betondeckung von 1,5 bzw. 2,5 cm (vgl. Bild 40, Anlage 6). Bei allen Betonarten hatten zumindest Karbonatisierungsspitzen die Bewehrungsstäbe erreicht. An allen Bewehrungsstäben in den Zwischenstücken wurde deshalb unabhängig von der Betonart stets, wenn auch meist nur leichte, Korrosion festgestellt.

Einige Zwischenstücke, hergestellt mit dem Leichtbeton L1, wiesen schmale, bis zu 20 cm lange Längsrisse auf. Ein signifikanter Einfluß dieser Längsrisse auf die Häufigkeit, die flächenmäßige Ausdehnung oder die Intensität der Korrosion der Bewehrungsstäbe war jedoch nicht festzustellen (vgl. Tabelle 12). Bei der Betonart L1 erstreckten sich über 12 % der Stablänge Längsrisse im Beton. Innerhalb dieses Bereichs lagen jedoch nur 3 % der Korrosionsstellen.

Der Einfluß der Betonart zeigte sich in einer deutlichen Abnahme der Korrosionshäufigkeit bei L3 und N im Vergleich zu L1 und L2. Die Anzahl der Korrosionsstellen bezogen auf die untersuchte Stablänge war bei den in München ausgelagerten Balken etwa doppelt so groß, wie bei den in Rheinhausen gelagerten Balken.

Tabelle 12: Längsrisse in den Zwischenstücken

Betonart	Anzahl der geprüften Stäbe	davon Rostfrei	Anzahl der Korrosionsstellen		davon Rostgrad				Längsrißlänge Σ in cm
			insges.	jelfd.Stab	Ro1	Ro2	Ro3	Ro4	
L1/R	16	1	47	2,5	20	14	7	6	223
L1/M	4	0	20	4,4	13	4	2	1	13
L2	4	0	16	3,5	6	2	5	3	0
L3	4	0	6	1,3	4	2	-	-	0
N	12	8	7	0,5	4	2	-	1	0

4. Intensität der Korrosion

4.0 Vorbemerkung

Die ersten beiden Entnahmen von Versuchskörpern dieses Versuchsprogramms erfolgten nach dreijähriger und sechsjähriger Auslagerungszeit. Die Ergebnisse wurden in den Versuchsberichten /5/ und /7/ mitgeteilt. Im Jahr 1976 wurden von Schießl umfangreiche Untersuchungen mit Korrosionsauslagerungsbalken aus Normalbeton veröffentlicht /6/. Die dort mitgeteilten Zusammenhänge und Auswertungsmethoden sind für die Beurteilung von Auslagerungsversuchen von grundsätzlicher Bedeutung. Im vorliegenden Bericht wird deshalb die Auswertung nicht nur nach dem Schema des Berichts über die erste Entnahme /5/ vorgenommen, sondern es werden, wie bereits im Bericht zur zweiten Entnahme /7/, die in /6/ mitgeteilten Verfahren angewandt, um einen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen.

Der Einfachheit halber wird im Folgenden kurz zusammengefaßt, auf welche der in /6/ mitgeteilten Ergebnisse, Deutungen und Auswertmethoden im vorliegenden Bericht Bezug genommen wird.

Es wird allgemein vorausgesetzt, daß Korrosion der Bewehrung nur in karbonatisierten Betonbereichen auftritt. Für die Korrosionshäufigkeit ist daher von Bedeutung, daß die Auswertungen von Schießl darauf hinwiesen, daß sich sowohl in ungerissenem Beton, wie auch an Rissen ein Endwert der Karbonatisierungstiefe einstellt. Dieser Endwert variiert je nach Dichtheit des Betons und wird nach unterschiedlicher Zeit erreicht. Außer von der Dichtheit des Betons hängt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit an Rissen noch von der Rißbreite und einer eventuellen Verstopfung der Risse durch Schmutzablagerung ab. Da an breiten Rissen die Karbonatisierungsfrent den Bewehrungsstahl schneller erreicht, beginnt die Korrosion bereits nach kurzer Auslagerungsdauer. Mit zunehmender Auslagerungszeit erreicht jedoch die Karbonatisierung bei den üblichen Betondeckungen meist auch an schmälere Rissen den Bewehrungsstahl. Der Einfluß der Rißbreite auf die Intensität der Korrosion ist deshalb nach kurzer Auslagerung am deutlichsten und nimmt im Laufe der Zeit immer mehr ab. In dauernd karbonatisierten Betonbereichen bzw. Rissen ist die Korrosionsgeschwindigkeit weitgehend unabhängig von der Betondeckung und der Rißbreite. Sie wird durch zufällige Einflüsse, wie Belüftung und Feuchtigkeit bestimmt.

Als Kennzeichen für dauernd korrosionsaktive Bereiche der Stahloberfläche, d.h. dauernd karbonatisierten Beton (Normalbeton) setzt Schießl eine mittlere Korrosionsabtragungstiefe von 0,01 mm nach 10jähriger Auslagerung an. Im Vergleich dazu ist anzumerken, daß maximale Abtragungsgeschwindigkeiten bis 0,04 mm/Jahr beobachtet wurden.

Für alle Korrosionsstellen mit geringerer mittlerer Abtragungstiefe als 0,01 mm/10 Jahre nimmt Schießl an, daß der den Stahl umgebende Beton nicht dauernd karbonatisiert war, sondern daß die Karbonatisierungsfrent die Stahloberfläche nur zeitweise erreichte. Als mögliche Ursache für eine zeitweilige Abnahme der Karbonatisierungstiefe gibt er die Diffusion von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus dem alkalischen Betonbereich in den karbonatisierten an. Dabei kommt es zu einer „Realkalisierung“ des Betons und damit zu einer erneuten Passivierung der Stahloberfläche.

Den in /6/ mitgeteilten Ergebnissen und dort angewandten Auswertemethoden wird im vorliegenden Bericht dadurch Rechnung getragen, daß zusätzlich Auswertungen für den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Korrosionsstellen bzw. dem Querschnittsverlust und der Rißbreite angegeben werden.

4.1 Maßstab zur Beurteilung des Ausmaßes der Korrosion

Die Beeinträchtigung der Festigkeit und Verformungsfähigkeit der Stähle infolge Korrosion kann am einfachsten durch statische Zugversuche und Dauerschwingversuche festgestellt werden. Bei der Ermittlung der Querschnittsminderung sind dagegen vor allem bei örtlich begrenzter Ausdehnung der Korrosion gewisse Schwierigkeiten zu überwinden.

Im Zuge der bisher am Lehrstuhl für Massivbau der TU München durchgeführten Untersuchungen zur Frage der Korrosion der Bewehrung an Rißstellen wurde zur Quantifizierung der Korrosion ein Verfahren entwickelt, das relativ gut reproduzierbare Ergebnisse liefert:

Zunächst wird die Tiefe der Korrosionsabtragungen bezüglich der umgebenden ungeschädigten Oberfläche des Bewehrungsstahls bestimmt. Auf der Grundlage dieser Meßergebnisse werden dann augenscheinlich Flächen gleicher Korrosion den einzelnen Rostgraden mit definierten mittleren Abtragungstiefen zugeordnet. Berücksichtigt man zusätzlich, über

welchen Anteil des Stabumfangs sich die Korrosion erstreckt, so kann man die mittlere Abtragungstiefe bzw. den Querschnittsverlust errechnen.

In Anlehnung an frühere Versuche wird folgende Einteilung der Rostgrade gewählt:

Rostgrad 0 : "kein Rost" (Ro0)

Rostgrad 1 : "schwacher Oberflächenrost" (Ro1)
Abtragung bis 0,01 mm

Rostgrad 2 : "ausgeprägter Oberflächenrost" (Ro2)
Abtragung 0,01 - 0,10 mm

Rostgrad 3 : "Rostbildung mit deutlicher Abtragung" (Ro3)
Abtragung 0,10 - 0,30 mm

Rostgrad 4 : "starker Rostangriff mit Bildung von Rost-
abblätterung und Lochfraß" (Ro4)
Abtragung > 0,30 mm

Entsprechend den Annahmen in /6/ sind nach 10jähriger Auslagerung alle Korrosionsstellen mit Rostgraden von 2 und mehr als dauernd aktiv anzusehen.

Die Bilder 17a bis d zeigen Beispiele für Korrosionsstellen der Rostgrade 1 - 4.

Bild 16 vermittelt einen Eindruck vom Aussehen der Bewehrungsstähle anhand längerer Stababschnitte. Auch hier wurde für jeden Rostgrad ein Beispiel gewählt. Der Abstand der Korrosionsstellen entspricht in nicht karbonatisierten Bereichen dem Rißabstand in den Versuchskörpern.



Bild 16:
Beispiele für die
Rostgrade Ro1 bis Ro4

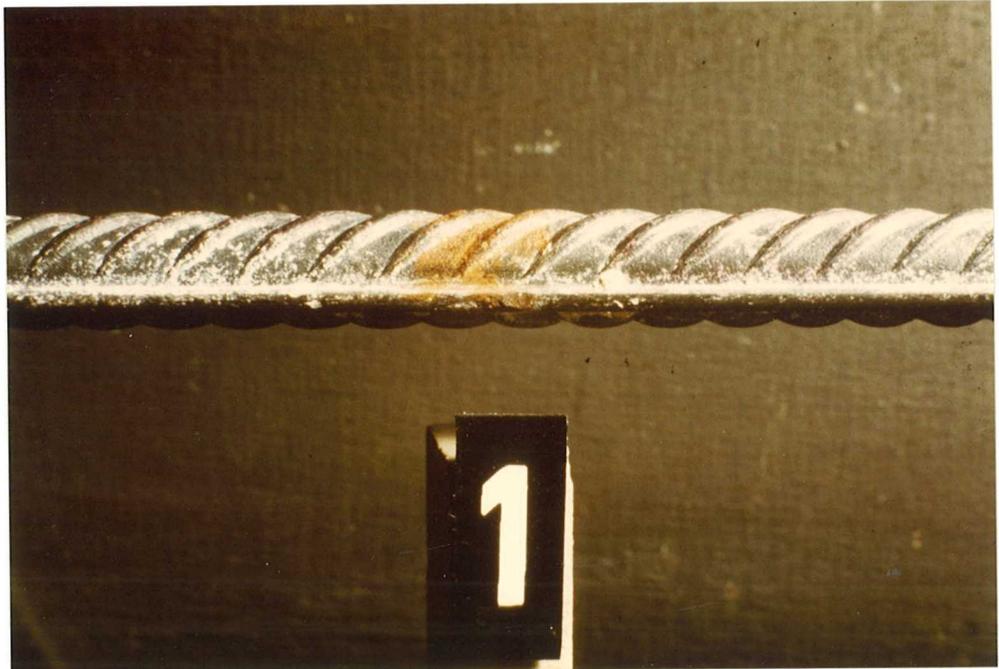


Bild 17a: Beispiel für Rostgrad 1 (Ro1)

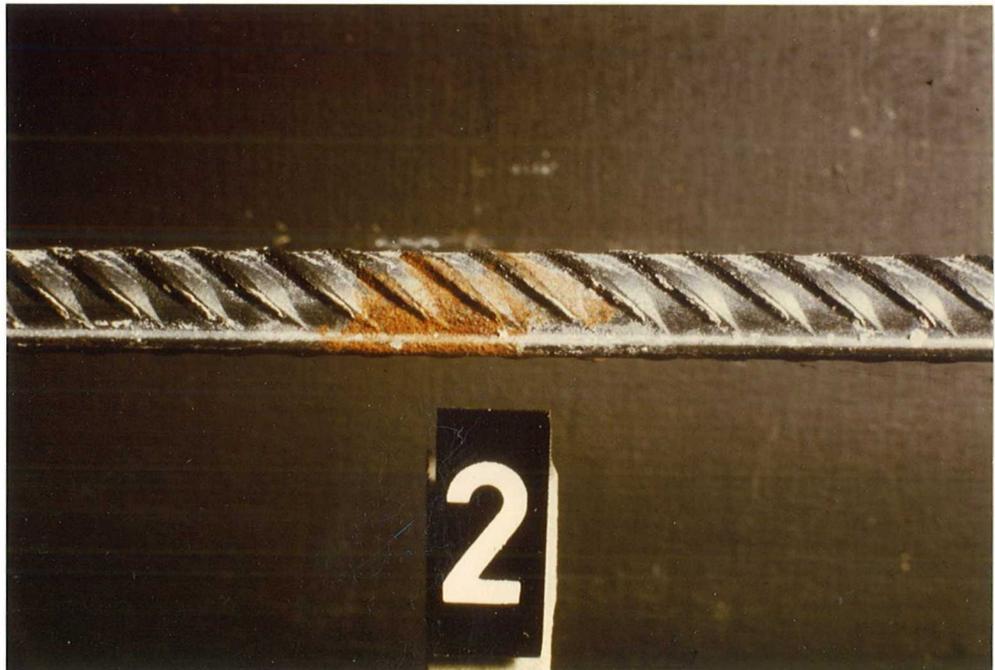


Bild 17b: Beispiel für Rostgrad 2 (Ro2)



Bild 17c: Beispiel für Rostgrad 3 (Ro3)



Bild 17d: Beispiel für Rostgrad 4 (Ro4)

4.2 Maßgebende Rißbreite

Das Ausmaß eines eventuellen Einflusses der Rißbreite auf die Korrosion (Häufigkeit und Intensität) der Stahleinlagen hängt von den während der gesamten Auslagerung im Mittel vorhandenen Rißbreiten sowie den Diffusionsverhältnissen (Verstopfung) in den Rissen ab. Der Auswertung der Ergebnisse werden deshalb die Mittelwerte der bei Beginn und bei Ende der Auslagerung gemessenen Rißbreiten zugrundegelegt, da, wie in Abschnitt 3.2 bereits festgestellt, keine nennenswerten Veränderungen der Rißbreiten im Verlauf der Auslagerung gemessen wurde.

Zur Ermittlung der maßgebenden Rißbreite wurden die Rißbreiten an den Projektionen der Stahleinlagen auf der Betonzugseite an drei Stellen gemessen und der Mittelwert dieser Einzelablesungen gebildet. Würde man die größten gemessenen Rißbreiten zugrunde legen, so könnte das Ergebnis erheblich verfälscht werden, da es sich in vielen Fällen nur um örtlich eng begrenzte Fehlstellen im Beton (ausgebrochene Zuschlagkörner etc.) handelt. Die tatsächlich am Bewehrungsstab vorhandene Rißbreite ist kleiner, als die an der Betonoberfläche gemessenen Werte. Dies folgt aus der Verbundwirkung der Stäbe und der daraus resultierenden Verwölbung der Rißflächen in unmittelbarer Nähe der Stahleinlagen /2,6/. Die zufällige Lage der Rippen in Bezug auf den Riß verursacht dabei jedoch erhebliche Streuungen. Aufgrund der Untersuchungen in /6/ ist der Einfluß der Verwölbung der Rißflächen bei den hier angewendeten Betondeckungen und Querschnittsabmessungen jedoch so gering, daß er vernachlässigt werden kann.

Die auf der Zugseite der Balken gemessenen Rißbreiten sind größer als die an den Seitenflächen gemessenen, wobei eine annähernd lineare Abnahme der Rißbreite von der Zugseite zur Null-Linie angenommen werden darf.

Aus diesen Tatsachen folgt jedoch nicht unbedingt ein Einfluß auf die Korrosion, da die Bedeutung der Rißbreite durch die Zerstörung des Beton-Mikrogefüges durch die Verbundkräfte in unmittelbarer Umgebung des Bewehrungsstabes erheblich eingeschränkt wird.

4.3 Art der Darstellung der Versuchsergebnisse

Die Darstellungsformen der Versuchsergebnisse entsprechen dem Bericht zur 2. Entnahme nach sechsjähriger Auslagerungszeit. Zusätzlich wurde eine Auswertung der stark korrodierten Stäbe nach dem unter 4.0 beschriebenen Schema vorgenommen.

- 1) Angabe des jeweils stärksten, beobachteten Rostgrades an einer Rißstelle:

Diese Aussage ermöglicht nur eine qualitative Abschätzung verschiedener, die Korrosion beeinflussender Faktoren. Zur grafischen Darstellung wurden die Einzelergebnisse jeweils in Rißbreitenklassen von 0,10 mm Breite zusammengefaßt und der Anteil der stärksten, beobachteten Rostgrade in Diagrammen aufgetragen

(siehe Bilder 62 bis 71, Anlage 20 für die Längsbewehrung
bzw. Bilder 92 bis 100, Anlage 25 für die Querbewehrung)

- 2) Ermittlung der größten aufgetretenen Korrosionsabtragung an jeder Rißstelle:

Sie ermöglicht die Darstellung der dadurch bedingten Querschnittsminderung in Abhängigkeit von der Rißbreite und damit eine quantitative Angabe der Schädigung

(siehe Bilder 72 - 81, Anlagen 21 - 22 für die Längsbewehrung
bzw. Bilder 102 - 111, Anlagen 26 - 27 für die Querbewehrung)

- 3) Summenhäufigkeiten der Querschnittsschwächung für Rißbreitenklassen von 0,10 mm Breite

(siehe Bilder 82 - 91, Anlage 23 - 24).

- 4) Zusätzliche Auswertung in Anlehnung an /6/:

Anteil der stark korrodierten, d.h. dauernd aktiven Korrosionsstellen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Risse. Als Ergebnis „dauernder Korrosion“ wurde entsprechend /6/ eine Abtragungstiefe von $t_m = 0,01$ mm angesehen, was bei 8 mm-Stäben einer Querschnittsschwächung um 0,5% entspricht. Dieser Quotient wurde über den Rißbreiten aufgetragen (Bilder 24 - 31, Seiten 55 - 56)

Für die Ermittlung des Einflusses der Betondeckung werden die genannten 4 Auswertungsarten auch für ungerissenen Beton durchgeführt.

4.4 Korrosion der Längsbewehrung

4.4.1 Einfluß der Lage der Versuchskörper

Für die Zugseiten (Betonierunterseiten) aller Balken kann gleiche Lagerung angenommen werden, da der Einfluß der Himmelsrichtungen vernachlässigbar ist. Für die Schmalseiten (Betonierseitenflächen) der Balken ergeben die Lage nach oben bzw. nach unten unterschiedliche Bedingungen (vgl. Bild 4, Seite 15). Wie unter 3.4.1 beschrieben, verursachte die unterschiedliche Orientierung der Betonierseitenflächen in einigen Fällen geringfügig unterschiedliche Karbonatisierungsgeschwindigkeiten.

Im ungerissenen PZ-Beton ist das Auftreten von Korrosion nur in karbonatisierten Bereichen möglich. Bei allen Versuchskörpern war die mittlere Karbonatisierungstiefe geringer als die kleinste Betondeckung der Bewehrungsstäbe. An Karbonatisierungsspitzen, die die Bewehrung erreicht hatten, kam es bei den Leichtbetonarten und in einem Fall auch bei Normalbeton zu Korrosion.

An den in Rheinhausen ausgelagerten Balken des Typs B1 zeigte sich unabhängig von der Betonart ein sehr deutlicher Einfluß der Lage der Versuchskörper. Alle Korrosionsstellen waren an untenliegenden Stäben (b) entstanden.

Da an den in München ausgelagerten Balken nur drei Roststellen im ungerissenen Bereich festgestellt wurden, läßt sich hier zum Einfluß der Lage keine Aussage treffen. Gleiches gilt für Typ P2 und P1/N.

Bei den Balken des Versuchskörpertyps P1/L1 lag mit 62% der Roststellen etwa die Hälfte am untenliegenden Stahl. Infolge der wesentlich größeren seitlichen Betondeckung im Gegensatz zu Typ B1 (6,1 cm gegenüber 2,6 cm) kommt dem Einfluß der Orientierung hier eine kleinere Bedeutung zu.

Als Ursache für die häufigere Korrosion der untenliegenden Bewehrungsstäbe ist der hier herrschende geringe Feuchtigkeitsgehalt und daraus resultierend die etwas größere Karbonatisierungsgeschwindigkeit anzunehmen. Des Weiteren kann auch die Verschmutzung der Balkenoberseite eine Verzögerung der Karbonatisierung und der anschließenden Korrosion bewirken.

An Rissen wurde im Gegensatz zur vorangegangenen Entnahme bei keinem Versuchskörper-Typ ein signifikanter Einfluß der Lage festgestellt. Ursächlich hierfür ist offensichtlich die Tatsache, daß die Karbonatisierung der Rißufer seit der letzten Entnahme nun auch die oben liegende Bewehrung in vielen Fällen erreicht hat und somit den damals festgestellten Einfluß verwischte.

Für die weiteren Auswertungen an Rißstellen kann somit auf eine Berücksichtigung der Lage der Bewehrungsstäbe verzichtet werden.

4.4.2 Einfluß der Verbügelung auf die Korrosion der Längsbewehrung

Wie bereits in früheren Untersuchungen an Normalbeton /2, 3/ und im Bericht zur 2. Entnahme festgestellt, ergab sich ein Einfluß zur bevorzugten Bildung von Korrosion an Berührungsstellen von Längs- und Querbewehrung.

Bei Rissen an der Querbewehrung trat bei acht von zehn Versuchskörpertypen an allen Längsstäben Korrosion auf. Bei Rissen außerhalb der Querbewehrung lag der Anteil der korrodierten Längsstäbe bei etwa 90%, war also nur wenig kleiner (vgl. Tab. 25, Anlage 15). Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich dieser Einfluß umso deutlicher zeigte, je geringer die Anzahl der Risse an der Querbewehrung im Verhältnis zur Anzahl der Risse im übrigen Bereich war, d.h., daß dort durch die Querbewehrung ein anormal großer Rißabstand und damit eine größere Rißbreite vorgegeben war.

In den ungerissenen Bereichen bestätigt ein Vergleich der beiden Versuchskörpertypen P2/L1 und B1/L1 den negativen Einfluß einer Verbügelung.

Bei gleicher Betondeckung der Längsbewehrung bildeten sich bei B1 (außenliegende Bügel) 14 Korrosionsstellen, bei P2 (innenliegende Querstäbe) dagegen nur zwei (siehe Tabelle 10, Seite 33).

Als wirksame, für den Korrosionsschutz zur Verfügung stehende Betondeckung kann also auch für die Längsbewehrung nur die Betondeckung der Querbewehrung angesetzt werden.

4.4.3 Einfluß der Betondeckung

Der Einfluß der Betondeckung von 1,5 bis 3,6 cm (vgl. Tabelle 3, Seite 5) folgt aus dem Vergleich der Versuchskörpertypen P1 und P2 bzw. B1 und B2. Derartige Versuchskörper wurden sowohl mit Leichtbeton L1 (Liapor mit Leichtsand) wie auch mit Normalbeton hergestellt.

Die Intensität der Korrosion an Rissen war auch nach 11jähriger Auslagerung von der Betondeckung beeinflusst. Mit wachsender Betondeckung nahm insbesondere der Anteil starker Korrosion erheblich ab.

Für Leichtbeton L1 wird diese Tatsache beim Vergleich der Versuchskörper P1 ($\bar{u}_B = 15$ mm) und P2 ($\bar{u}_B = 25$ mm) (Bilder 62 und 64, Anlage 20) B1 ($\bar{u}_B = 25$ mm) und B2 ($\bar{u}_B = 35$ mm) (Bilder 66 und 71, Anlage 20) deutlich.

Pauschal läßt sich etwa erkennen, daß die Vergrößerung der Betondeckung um 1 cm die Intensität der Korrosion um einen Rostgrad abminderte. Bei insgesamt geringerer Intensität der Korrosion gilt die genannte Größe des Einflusses der Betondeckung auch für Normalbeton (Bilder 63 und 65, Anlage 20). Um die Häufigkeit des Rostgrads 4 (starke Korrosion mit Lochfraß) auch bei großen Rißbreiten (0,3 mm) unter 20% zu drücken, war bei Leichtbeton L1 bei innen liegender Querbewehrung eine Betondeckung von 2,5 cm und bei Normalbeton eine Betondeckung von 1,5 cm erforderlich.

Die Ergebnisse einer in Anlehnung an /6/ durchgeführten Auswertung nach dem in Abschnitt 4.4.3 unter 4 beschriebenen Schema sind in den folgenden Tabellen 13 und 14 zusammengestellt. Dabei wurde die Anzahl der Risse, an denen die Bewehrung stark korrodiert war ($\Delta A > 0,5\%$), ins Verhältnis gesetzt zur Gesamtzahl der vorhandenen Risse.

Der Vergleich der Versuchskörpertypen P1 und P2 zeigt die Auswirkung der Vergrößerung der Betondeckung um 1 cm. Der Anteil der starken Korrosion ging dadurch

- bei Leichtbeton L1 von 79 auf 46% und
- bei Normalbeton von 30 auf 23% zurück.

Demgegenüber zeigt sich bei einem Vergleich der Versuchskörpertypen B1/L1 und B2/L1 nur ein unbedeutender Rückgang des Anteils starker Korrosion.

Die Vergrößerung der Betondeckung bewirkt hier einen größeren Abstand

(siehe Anzahl der Risse) und damit eine Vergrößerung der mittleren Rißbreite von 0,2 auf 0,3 mm (siehe Tabelle 6). Dies führte zum relativ häufigeren Auftreten starker Korrosion. Dadurch wurde der günstige Einfluß der größeren Betondeckung nahezu wieder ausgeglichen.

Im ungerissenen Bereich trat beim Leichtbeton L1 Korrosion an der Längsbewehrung auf. Nur bei dieser Betonart hatte die Karbonatisierungsfrent bei der Betondeckung 1,5 cm bzw. eine größere Anzahl von Karbonatisierungsspitzen bei den größeren Betondeckungen die Längsbewehrung erreicht. Setzt man als „wirksame“ Betondeckung bei außen liegenden Bügeln die Betondeckung der Bügel und nicht die der Längsbewehrung an (vgl. Abschnitt 4.4.2), so ergibt der Vergleich der Versuchskörper einen klaren Einfluß der Betondeckung auf die Häufigkeit von Korrosion mit einer Abtragungstiefe von mehr als 0,01 mm:

Versuchskörpertyp	:	P1	B1	P2
„wirksame“ Betondeckung /mm/:		1,5	1,8	2,5
Korrosionshäufigkeit	:	41%	21%	0% (vgl. Tabelle 14)

Tabelle 13: Prozentanteil der Korrosionsstellen mit einer Querschnittsschwächung $\Delta A > 0,5\%$ bezogen auf die Gesamtzahl der Beobachtungsstellen an Rissen

Versuchskörper	L1		L2		L3		N	
	RiB-anzahl	$\Delta A > 0,5\%$						
	n	%	n	%	n	%	n	%
P1 $\ddot{u}_b = 1,5$ cm	68	79 ↓	-	-	-	-	27	30 ↓
P2 $\ddot{u}_b = 2,5$ cm	61	46 ↓	-	-	-	-	30	23 ↓
B1 $\ddot{u}_b = 2,6$ cm	57	70 →	47	45 →	41	66 →	31	30 →
B1/M $\ddot{u}_b = 2,6$ cm	67	36	-	-	-	-	-	-
B2 $\ddot{u}_b = 3,6$ cm	38	66						

Tabelle 14: Prozentanteil der Querschnittsschwächungen $\Delta A > 0,5\%$ an der Bewehrung bezogen auf die Gesamtzahl der Korrosionsstellen n im ungerissenen Bereich, Leichtbeton L1

Balkentyp	L1	
	n	$\Delta A > 0,5\%$ %
P1 $\ddot{u}_b = 1,5 \text{ cm}$	17	41
P2 $\ddot{u}_b = 2,5 \text{ cm}$	2	0
B1 $\ddot{u}_b = 2,6 \text{ cm}$	14	21
B1/M $\ddot{u}_b = 2,6 \text{ cm}$	3	0
B2 $\ddot{u}_b = 3,6 \text{ cm}$	0	0

4.4.4 Einfluß der Rißbreite bei Leichtbeton und bei Normalbeton

Es wird im folgenden eine Auswertung auf Grundlage der in 4.3 beschriebenen Darstellungsformen durchgeführt.

Auswertung 1: Häufigkeit der Rostgrade

Die Häufigkeit der festgestellten Rostgrade, jeweils bezogen auf die in den einzelnen Rißbreitenklassen (Klassenbreite 0,1 mm) zur Verfügung stehende Gesamtzahl von Beobachtungen, zeigen die Bilder 62 - 71, Anlage 20.

Wie schon nach 6jähriger Auslagerungszeit war bei allen Versuchskörpertypen eine Tendenz zur Erhöhung der Intensität der Korrosion mit der Rißbreite feststellbar. Eine statistische Auswertung ist infolge der teilweise geringen Anzahl der innerhalb einzelnen Rißbreitengruppen vorhandenen Beobachtungsstellen nicht sinnvoll.

Es fällt auf, daß bei den Versuchskörpertypen P1/L1, B1/L2, B1/L1 M auch bei Rißbreiten kleiner als 0,1 mm vereinzelt starke Korrosion (bis zu 20% Rostgrad Ro4) festgestellt wurde.

Auswertung 2: Korrosionsabtragung t_m bzw. Querschnittsminderung ΔA
an Rissen

Die größte an jedem Riß beobachtete Korrosionsabtragung t_m bzw. Querschnittsminderung ΔA ist in den Bildern 72 bis 81, Anlagen 21 und 22 in Abhängigkeit von der jeweiligen Rißbreite aufgetragen. Ein Einfluß der Rißbreite ist bei allen Versuchskörpern zumindest insofern vorhanden, daß sich das Ausmaß der jeweils größten Schädigungen mit zunehmender Rißbreite etwa proportional vergrößerte. Obwohl an den meisten Versuchskörpervarianten eine Vielzahl von Meßwerten ermittelt werden konnte, ist wegen der großen Streuungen eine statistisch gesicherte, qualitative Aussage nicht möglich. Um aber wenigstens die Tendenzen aufzeigen zu können, wurden die Einzelwerte der Abtragungstiefe bzw. der Querschnittsminderung für die einzelnen Rißbreitenklassen (Klassenbreite 0,1 mm) gemittelt und diese Mittelwerte durch Ausgleichskurven verbunden (vgl. Bilder 18 bis 23). Auf diese Weise wird ein anschaulicher Vergleich der Versuchskörper hinsichtlich der gewählten Parameter möglich.

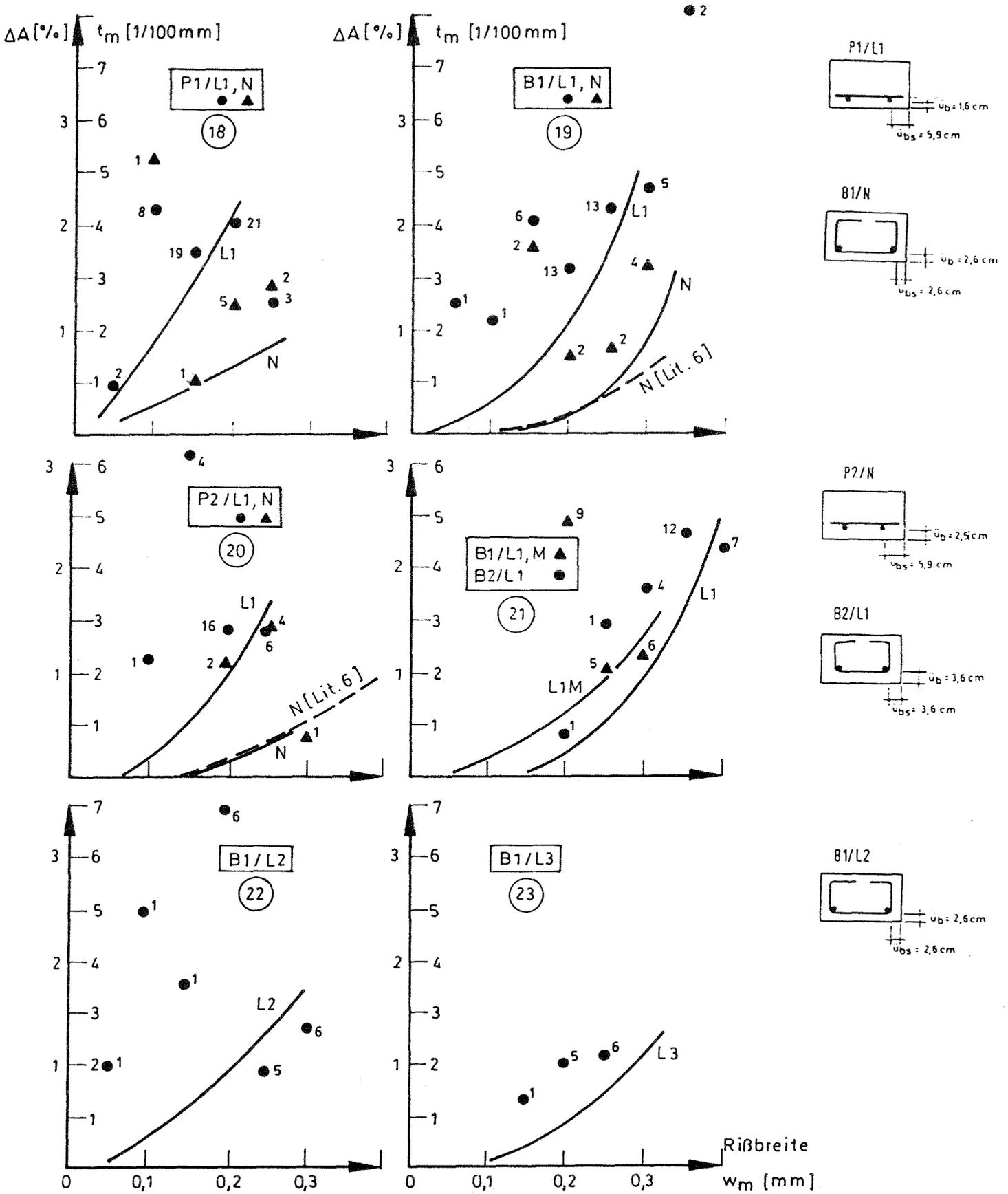
Zusätzlich wurden in diese Bilder auch die Mittelwerte der Korrosionsabtragungen $\Delta A > 0,5\%$ je Rißbreitengruppe eingezeichnet. Die Beschränkung auf Beobachtungsstellen mit starker Korrosion vermindert allerdings die zur Verfügung stehenden Einzelbeobachtungen so sehr, daß in einigen Rißbreitenklassen keine Mittelwerte aus wenigstens 3 Meßwerten mehr angegeben werden konnten.

Die Darstellung in den Bildern 18 bis 23 berücksichtigt im Gegensatz zu den Bildern 72 bis 81 Korrosionsstellen im ungerissenen Bereich nicht. Alle diese Ausgleichskurven bestätigen die Abhängigkeit der Intensität der Korrosion von der Rißbreite.

Beschränkt man die Betrachtung auf starke Korrosion ($\Delta A > 0,5\%$), so deutet sich der obige Zusammenhang bei einigen Versuchskörpervarianten nur an, allgemein ist er dann weit weniger ausgeprägt. Die sich dann in den einzelnen Rißbreitenklassen ergebenden Mittelwerte sind in den Bildern 18 bis 23 als Punkte eingezeichnet, wobei jeweils die Anzahl der für die Mittelbildung verwendeten Beobachtungen angegeben ist.

Ein Vergleich der beiden Ausgleichskurven in Bild 18 und 19 zeigt, daß sich sowohl beim Platten- als auch beim Balkentyp ein deutlich günstigeres Verhalten des Normalbetons gegenüber dem Leichtbeton L1 ergab. Setzt man die Versuchsergebnisse der beiden anderen Leichtbetonarten hierzu in Relation, so zeigt sich, daß L2 (Bild 22), obgleich hier sehr große Abweichungen von der Ausgleichskurve vorliegen, ungefähr L1 entsprach, während die Kurve für L3 (Bild 23) ähnlich der des Normalbetons verläuft.

In die Bilder 19 und 20 sind die aus /6/ entnommenen Kurven für Normalbeton eingezeichnet. Diese statistisch abgesicherten Kurven stimmen mit den im vorliegenden Versuchsprogramm gewonnenen Kurven gut überein, obwohl für letztere wesentlich weniger Ergebnisse ausgewertet werden konnten. Diese Tatsache kann als Bestätigung für die Brauchbarkeit dieser nur aus wenigen Ergebnissen gewonnenen Kurven angesehen werden.



Bilder 18 - 23: Vergleich der Ausgleichskurven aller gemessenen Querschnittsschwächungen (vgl. Einzelmeßwerte Bilder 72 - 81, Anlagen 21 und 22) mit den Mittelwerten der Korrosionsabtragungen $\Delta A > 0,5\%$ je Rißbreitengruppe und Versuchsvariante

Auswertung 3: Summenhäufigkeit der Querschnittsminderungen ΔA an Rissen

Die Querschnittsminderungen wurden für jede Versuchsvariante in Abhängigkeit von den Rißbreitenklassen in Summenhäufigkeitsdiagrammen (Bilder 82 bis 91, Anlagen 23 und 24) aufgetragen. Infolge der in einigen Fällen zu geringen Anzahl von Beobachtungsstellen können innerhalb einzelner Rißbreitenklassen (Klassenbreite 0,1 mm) keine Darstellungen der Häufigkeit angegeben werden.

Ein deutlicher Einfluß der Rißbreite auf die Häufigkeit starker Korrosion zeigt sich bei allen Versuchskörpern aus Leichtbeton L1. Bei den Balken aus Leichtbeton L3 und Normalbeton war diese Abhängigkeit nur andeutungsweise vorhanden. Bei Leichtbeton L2 ergaben sich für mittlere Rißbreiten die größten Querschnittsminderungen. Diese einzige Ausnahme kann aber aufgrund der großen Streuungen bei kleiner Probenanzahl als nicht signifikant bezeichnet werden.

Der Einfluß der Betondeckung wurde bei großen Querschnittsschwächungen immer geringer, während der Einfluß der Rißbreite im allgemeinen erhalten blieb. Dies wird durch einen Vergleich der Versuchskörper aus L1 (P1-P2, B1-B2) und Normalbeton (P1-P2) deutlich.

Die Betonart übte, wie bereits festgestellt, einen deutlichen Einfluß auf die Häufigkeit der Korrosion an Rißstellen, unabhängig von der Größe der Querschnittsschwächung, aus. Bei beiden Plattentypen P1 und P2 wies Normalbeton im Gegensatz zu Leichtbeton L1 deutlich bessere Versuchsergebnisse auf. Gleiches gilt beim Balkentyp B1 für L1 und L2, während sich L3 bei großen Querschnittsschwächungen den Werten des Normalbetons annäherte.

Auswertung 4:

Entsprechend der in /6/ getroffenen Einteilung der Korrosionsstellen in dauernd aktive ($\Delta A > 0,5\%$ bei Normalbeton nach 10 Jahren) und nur zeitweise aktive wurde die Anzahl der Rißstellen mit dauernd aktiver Korrosion zur Gesamtzahl der Risse ins Verhältnis gesetzt. Die Bilder 23 bis 30 zeigen den Zusammenhang dieser Werte mit der Rißbreite nach 6- und nach 11jähriger Auslagerung.

Die Steigung der Ausgleichsgeraden zeigt, daß bei allen Leichtbetonarten auch nach 11 Jahren die Häufigkeit starker Korrosion (Querschnittsminderung $\Delta A > 0,5\%$) noch deutlich von der Rißbreite abhängig war.

Wegen der geringen Anzahl von Beobachtungen im Bereich der kleinen und der großen Rißbreiten sind jedoch die Steigungen der eingezeichneten Ausgleichsgeraden statistisch wenig abgesichert. Trotzdem kann als sicher gelten, daß die Auswirkung der Rißbreite für die Leichtbetone wesentlich wichtiger ist, als für den Normalbeton. Die Ausgleichsgeraden für den Normalbeton verliefen zwar nach 6 Jahren Auslagerungsdauer für die größeren Betondeckung noch ähnlich steil, wie die der Leichtbetone. Nach 11jähriger Auslagerungsdauer war jedoch der Einfluß der Rißbreite beim Normalbeton nur noch gering, wie die kleine Steigung der Ausgleichsgeraden zeigt (Bilder 28, 29).

Aus den Bildern 24 bis 31 werden neben dem Einfluß der Betonart auch die Einflüsse der Betondeckung und des Auslagerungsorts deutlich.

Starke Korrosion war bei den Leichtbetonen stets erheblich häufiger, als beim Normalbeton.

Die Vergrößerung der Betondeckung um 1 cm reduzierte die Häufigkeit starker Korrosion um 30%.

Bei den in München ausgelagerten Leichtbeton-Probekörpern war die Häufigkeit starker Korrosion im Vergleich zum Auslagerungsort Rheinhausen nur etwa halb so groß (vgl. Bild 30).

11 Jahre

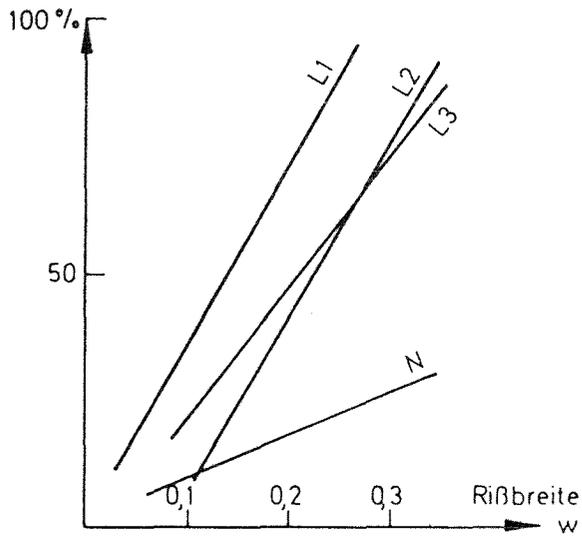


Bild 24

6 Jahre

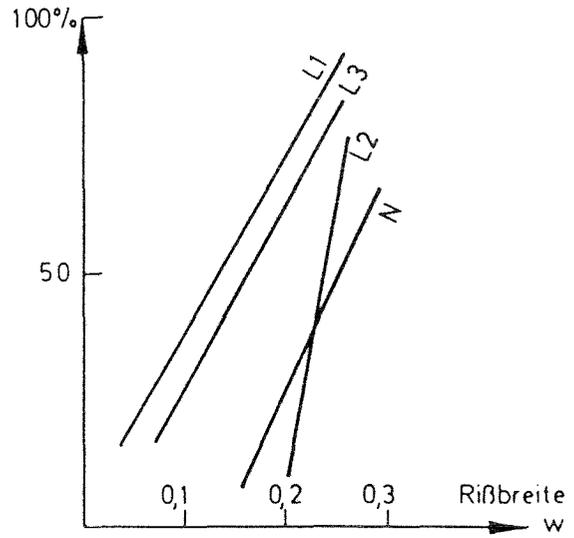


Bild 25

Einfluß der Betonart: L1, L2, L3, N

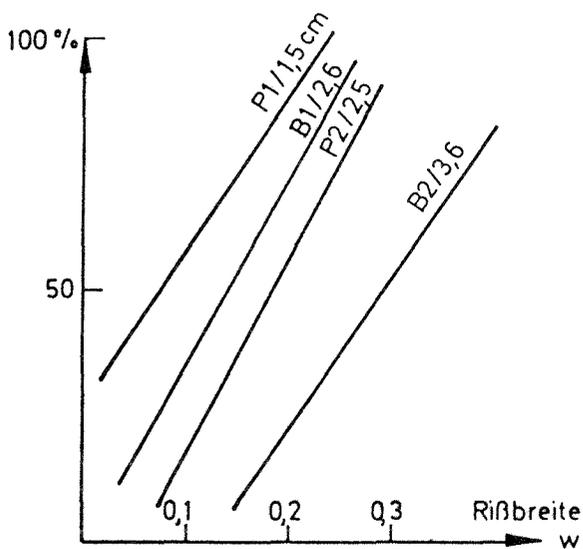


Bild 26

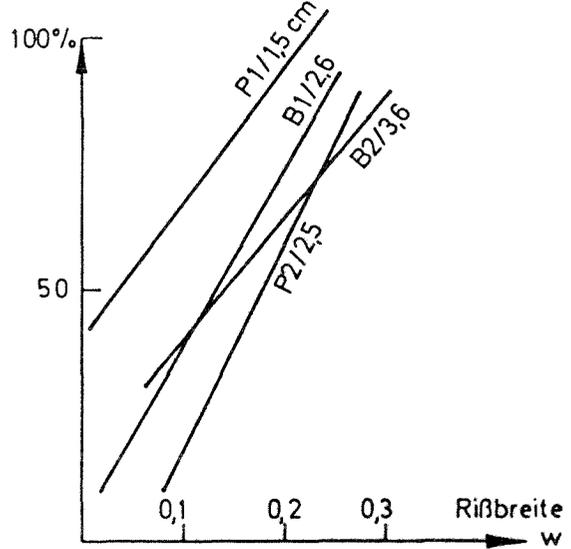


Bild 27

Einfluß der Betondeckung

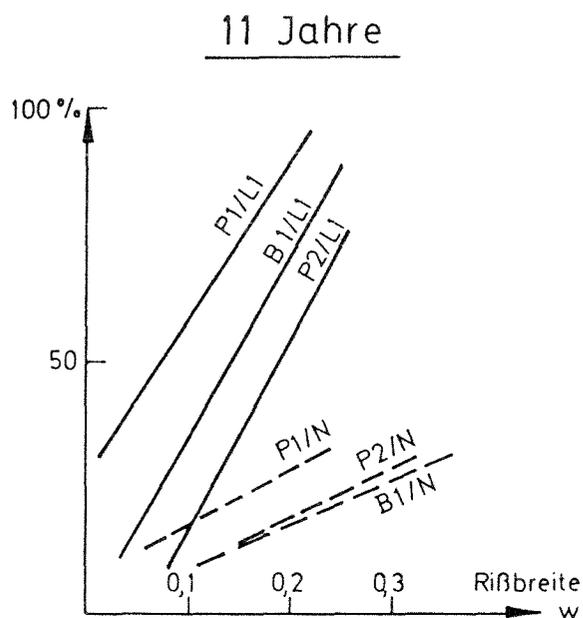


Bild 28

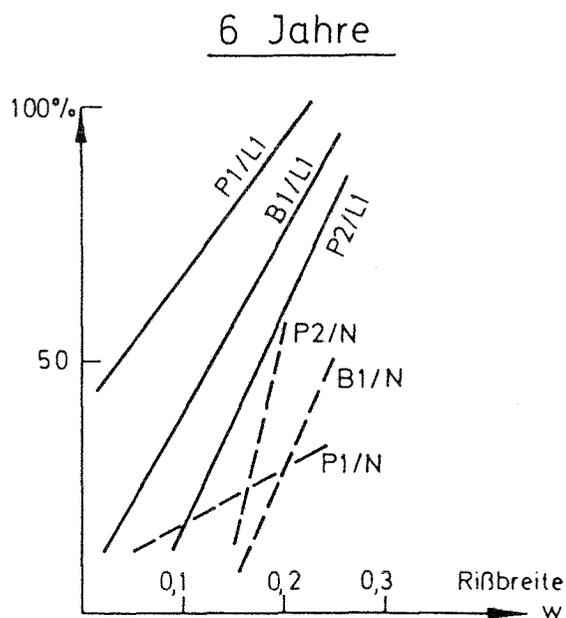


Bild 29

Einfluß der Betonart L1, N und der Betondeckung

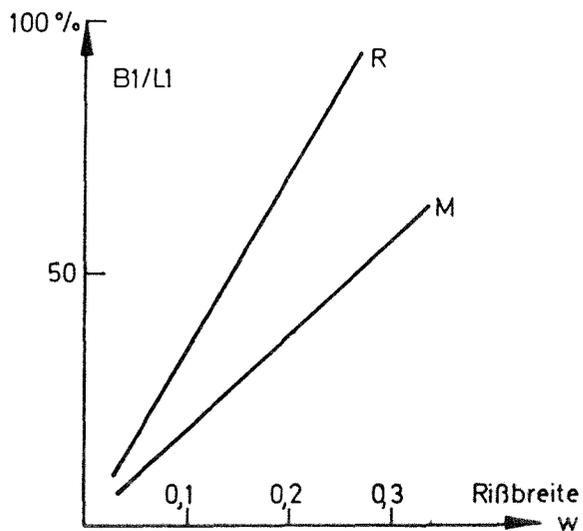


Bild 30

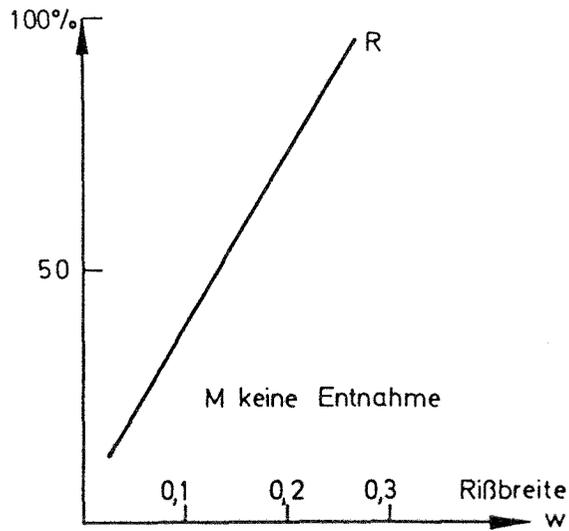


Bild 31

Einfluß des Auslagerungsorts: Rheinhausen, München

4.4.5 Einfluß der Auslagerungsdauer

Für die Betonarten Leichtbeton L1, L2 und L3 und Normalbeton N wurden die Ergebnisse nach 6- und 11jähriger Auslagerungszeit miteinander verglichen.

Die Bilder 32 bis 34 zeigen die Mittelwerte der Querschnittsminderung in Abhängigkeit von der Rißbreite.

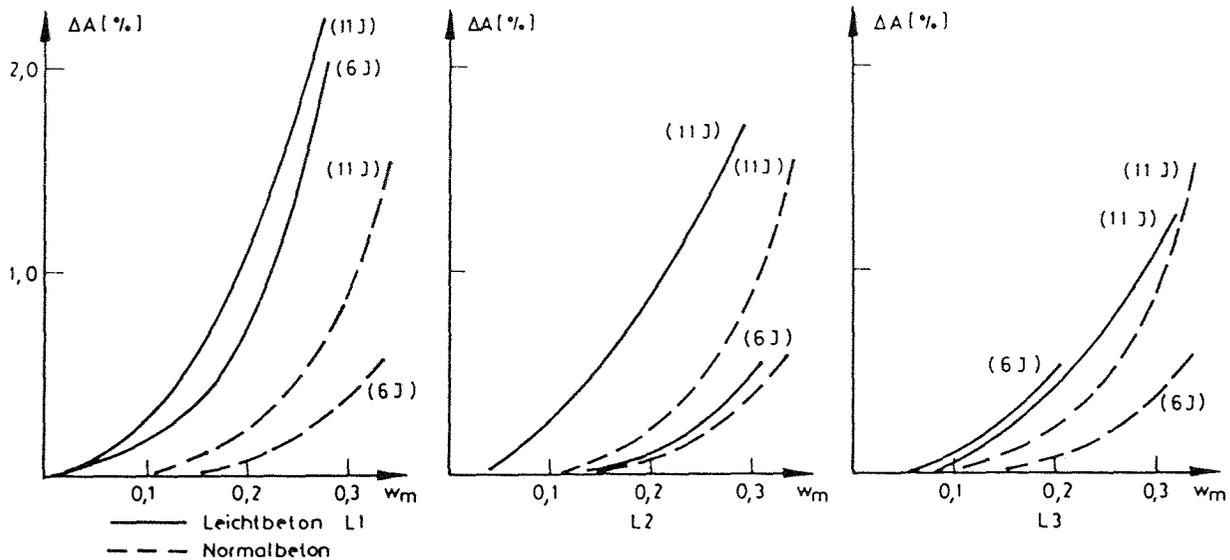


Bild 32

Bild 33

Bild 34

Bilder 32 bis 34: Einfluß der Auslagerungsdauer auf die Korrosionsabtragung;
Vergleich Leichtbeton - Normalbeton, Versuchskörper B1
($c = 2,5$ cm)

Bei allen Betonarten läßt sich eine deutliche Zunahme der mittleren Querschnittsminderung im Verlauf der Auslagerung erkennen.

Die Korrosionsabtragung (Mittelwert) war deutlich von der Rißbreite abhängig.

4.5 Korrosion an Querstäben bzw. Bügeln

Die Rostablesung erfolgte bei den Querstäben an 3 Stellen, bei den Bügeln an 5 Stellen. Die Lage der Ablesestellen zeigt Bild 35.

Für die Auswertung standen je Versuchskörper

- vom Plattentyp (P) 10 Querstäbe und
- vom Balkentyp (B) 5 Bügel

zur Verfügung.

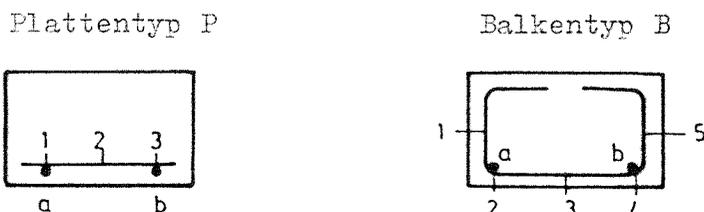


Bild 35: Lage der Ablesestellen

Als Maßstab für die Beurteilung der Intensität der Korrosion wurde, wie schon im vorigen Bericht /7/, der an den Ablesestellen der Zugseite der Versuchskörper vorgefundene Rostgrad gewertet, d.h. am Balkentyp (B) wurden nur die Beobachtungsstellen 2, 3 und 4 gewertet.

4.5.1 Korrosion an Rißstellen

Etwa 75% bis 100% der an Rissen gelegenen Querstäbe bzw. Bügel wiesen wenigstens eine Roststelle auf. In Tabelle 26, Anlage 19 ist die an den genannten Beobachtungsstellen gefundene Häufigkeit von Korrosion an der Querbewehrung zusammengestellt.

Der Rostansatz reichte nur in einem Fall (Balken B1/L1,10) über den gesamten Stabumfang. An allen übrigen Beobachtungsstellen war eine Konzentration der Korrosion an dem, der Betonaußenfläche zugewandten Teil der Querbewehrung festzustellen. Die Ausbreitung der Korrosion war dabei in einigen Fällen über maximal 70% des Stabumfangs fortgeschritten.

Die korrodierte Fläche reichte von einem Zentimeter Länge bis zu 80% der Länge der Querstäbe bzw. der Bügel. Die Bügelbewehrung war also in einigen Fällen auch außerhalb der Zugzone korrodiert (Ablesestellen 1 und 5 bei den Balken Typ B).

Die Bilder 92 bis 100 (Anlage 25) zeigen die Häufigkeit der an der Querbewehrung beobachteten Rostgrade für Rißbreitenklassen von jeweils 0,1 mm Breite. Die Abtragungen bzw. Querschnittsschwächungen der Querbewehrung in Abhängigkeit von der Rißbreite sind in den Bildern 101 bis 109 (Anlagen 26 und 27) dargestellt.

Wegen der geringen Anzahl von Beobachtungen kamen die an der Längsbewehrung gefundenen Zusammenhänge zwischen den Versuchsparametern und der Korrosion bei den Ergebnissen an der Querbewehrung nur undeutlich zum Vorschein.

Die Beobachtungen, daß

- bei Normalbeton geringere Korrosion auftrat, als bei den Leichtbetonarten (Bilder 105 bis 108, Anlagen 26 und 27).
 - die Versuchskörper vom Plattentyp P2, bei denen die Betondeckung der Querbewehrung am größten war (3,3 cm) sich am besten verhielten (Bilder 101 bis 105 und 108, Anlagen 26 und 27) und
 - die in München ausgelagerten Körper stärkere Korrosion aufwiesen, als die in Rheinhausen gelagerten (Bilder 105 und 110, Anlagen 26 und 27)
- bestätigen jedoch die Tendenz der Ergebnisse an der Längsbewehrung.

4.5.2 Korrosion im ungerissenen Bereich

Die Versuchskörper des Plattentyps aus Leichtbeton L1 wiesen nur jeweils eine Korrosionsstelle geringer Intensität im ungerissenen Bereich auf.

Demgegenüber wurden bei allen Leichtbetonarten des Balkentyps größere Querschnittsverluste festgestellt. Die jeweiligen Mittel- und Maximalwerte (in Klammern) betragen bei L1 0,93% (2,9%), bei L2 1,9% (4,0%) und bei L3 0,4% (1,0%).

Dieses Verhalten läßt sich durch die unterschiedlichen Betondeckungen beim Platten- und Balkentyp erklären. Karbonatisierungsspitzen waren bei Typ B1 in weiten Bereich bis an die außenliegenden Bügel vorge drungen.

Die Versuchskörper aus Normalbeton waren ohne Korrosion.

4.6 Auswirkung der Korrosionsschäden auf die Eigenschaften der Stähle

Durch abtragende Korrosion können sowohl die Festigkeitseigenschaften unter konstanter oder schwingender Zugbeanspruchung als auch das Verformungsverhalten des Betonstahls beeinträchtigt werden.

Zur Bestimmung des Betrags dieser Schädigung wurden Zug- und Dauerschwingversuche an korrodierten und rostfreien Proben durchgeführt.

Daneben konnte der Einfluß der Dauerbelastung durch einen Vergleich korrosionsfreier Proben aus nicht biegebelasteten Zwischenstücken mit solchen aus Balken erfaßt werden.

Die Ergebnisse der Versuche sind in den Anlagen 28 bis 30 zusammengestellt.

Die Auswertung der Zugversuche zeigte eine Abnahme der gemessenen Spannungen für Streckgrenze und Zugfestigkeit gegenüber den Nullversuchen vor der Auslagerung. Die Abminderung war bei den Stäben mit oder ohne Korrosion gleich groß. Es wurde also keine Schädigung durch Korrosion festgestellt.

Demgegenüber nahm die Bruchdehnung der korrodierten Proben stark ab. Vor der Auslagerung wurden im Mittel 22% gemessen, nach 11jähriger Auslagerung an rostfreien Proben, durch Streuungen bedingt, sogar 23%, an Proben mit Korrosionsstellen dagegen nur noch 17%. Dieser Wert entspricht den Meßergebnissen nach 3- und 6jähriger Auslagerung (18%). Es fällt auf, daß die Streuungen mit der Auslagerungszeit zunahm (Bild 111, Anlage 30). Dies ist ein für Korrosionsversuche üblicher Vorgang.

Letzteres gilt gegenüber der letzten Entnahme auch für die Ergebnisse der Dauerschwingversuche (Bild 112, Anlage 31). Hier lag der Mittelwert der ertragenen Lastwechsel zwischen den entsprechenden Werten der bisherigen Entnahmen.

In Bild 113 (Anlage 31) ist die Abhängigkeit der ertragenen Lastwechsel von der Querschnittsschwächung ΔA dargestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang. Insbesondere brachen Proben mit großen Querschnittsschwächungen schon bei geringen Lastspielzahlen. Dies war wegen der bei schwingender Belastung besonders schädlichen Kerbwirkung der Korrosionsnarben zu erwarten. Die untere Grenze des Streubereichs der Bruchlastspielzahlen deckte sich mit den Ergebnissen nach 3- und nach 6jähriger Auslagerung.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen eines Langzeit-Auslagerungsprogramms mit Stahlleichtbetonbalken mit Rissen wurden im Jahre 1971 insgesamt 80 Balken ausgelagert. Es wurden drei Leichtbetonarten mit unterschiedlichen Zuschlägen und zum Vergleich Normalbeton als LB 25 bzw. B 25 verwendet:

- L1: Blähton (Liapor 5) + Leichtsand (Lia-Sand)
- L2: Blähschiefer (Berwilit) + Leichtsand (Lia-Sand)
- L3: Blähton (Liapor 5) + Natursand (0/3 mm)
- N : Rheinkies (0/16 mm)

Die Balken wurden belastet, bis Rißbreiten von maximal 0,4 mm Breite auftraten. In belastetem Zustand wurden die Balken an folgenden Orten ungeschützt im Freien ausgelagert:

- Rheinhausen: stark verunreinigte Industrielatmosphäre
- München : normales Großstadtklima

Nach 3, 6 und 11 Jahren wurden Versuchskörper entnommen und im Labor geprüft. Es wurden die Einflüsse folgender Parameter auf die Korrosionserscheinungen an der Bewehrung untersucht:

- Leichtbetonart : L1, L2, L3 zum Vergleich Normalbeton
- Risse : ungerissene Bereiche bzw. Risse bis 0,4 mm Breite
- Auslagerungsort: Rheinhausen, München
- Betondeckung : 15 bis 35 mm
- Lage der Querbewehrung: außen, innen
- Auslagerungsdauer : derzeit 11 Jahre

Es zeigten sich folgende Ergebnisse:

Die verschiedenen Betonarten wiesen unterschiedliche Gasdurchlässigkeit und als Folge davon unterschiedliche Karbonatisierungstiefen auf. Wegen der Zementanreicherung am Schalungsboden waren zwar die Karbonatisierungstiefen auf der Balkenunterseite bei allen Betonen etwa gleich. Auf den Seitenflächen war die mittlere Karbonatisierungstiefe beim Leichtbeton L1 mit 10 bis 20 mm etwa viermal so groß wie beim Normalbeton. Die übrigen Leichtbetone lagen hinsichtlich der Karbonatisierungstiefen zwischen dem Leichtbeton L1 und dem Normalbeton.

Entsprechend der größeren Karbonatisierungstiefe war die Häufigkeit von Korrosion an der Bewehrung bei Leichtbeton größer als bei Normalbeton. Bei ungerissener Betondeckung verhielt sich der Leichtbeton L1 hinsichtlich Korrosionshäufigkeit der Bewehrung am ungünstigsten, der Normalbeton am besten. Die Leichtbetonarten L2 und L3 lagen dazwischen. An breiten Rissen ($w = 0,25$ mm) trat unabhängig von der Betonart stets Korrosion an der Bewehrung auf.

Bei schmalen Rissen und kleiner Betondeckung (15 mm) entstand an allen Rissen bei Leichtbeton L1 und Normalbeton Korrosion. Die Intensität der Korrosion war aber beim Leichtbeton größer als beim Normalbeton, da die Karbonatisierungsspitzen die Bewehrung früher erreicht hatten. Die Schädigung der Bewehrung war dabei jedoch gering.

Größere Betondeckung (25 mm) verminderte die Häufigkeit und insbesondere die Intensität der Korrosion, wobei sich jedoch ein ausgeprägter Einfluß der Rißbreite zeigte. Der Einfluß der Betondeckung zeigte sich beim Leichtbeton L1 wesentlich deutlicher als beim Normalbeton. Die Häufigkeit von Korrosion der Bewehrung an Rißstellen war bei Normalbeton erheblich geringer als bei den Leichtbetonarten, wobei zwischen diesen kein merklicher Unterschied bestand.

Eine weitere Vergrößerung der Betondeckung bei Leichtbeton auf 35 mm bewirkte eine Vergrößerung der Rißbreite, so daß hinsichtlich der Korrosion keine Verbesserung auftrat.

Seit der vorangegangenen Entnahme (5 Jahre Auslagerungsdauer) hatte sich die Korrosion verstärkt. Die maximale Korrosionsabtragung hatte im Mittel von 0,10 mm auf nunmehr 0,14 mm zugenommen. Das entspricht einer Abrostung von 7% des Querschnitts der 8 mm-Stäbe. Die größten Narbentiefen betrugen 0,70 mm.

Die Zugfestigkeit der Bewehrungsstäbe wurde durch die Korrosion im allgemeinen kaum beeinträchtigt. Die Bruchdehnung korrodierter Proben betrug in einigen Fällen nur noch zwei Drittel der Bruchdehnung blanker Proben bzw. des Ausgangsmaterials.

Für die noch ausstehende, abschließende Entnahme von ausgelagerten Probekörpern stehen, wie bei der Entnahme nach 11 Jahren nochmals je 2 Balken von jeder Variante der Versuchskörper zur Verfügung.

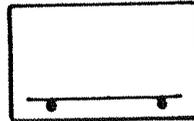
Literatur:

- /1/ Rehm, Martin : Zur Frage der Rißbegrenzung in Stahlbetonbau.
Beton- und Stahlbetonbau, Heft 8/1968
- /2/ Rehm, Martin, Schießl : Einfluß der Rißbreite auf die Rostbildung an der
Bewehrung in Stahlbetonbauteilen.
Bericht Nr. 6056 vom März 1969, Institut für Massivbau,
TU München
- /3/ Martin, Schießl : Auslagerungsversuche an Stahlbetonbalken.
Bericht Nr. 1441 vom Dezember 1970, Institut für
Massivbau, TU München
- /4/ Martin, Schießl : Einfluß der Rißbreite auf die Rostbildung an der
Bewehrung in Stahlbetonbauteilen"
Bericht Nr. 6325 vom Januar 1970, Institut für
massivbau, TU München
- /5/ Müller, Kirmair : Einfluß der Rißbreite auf die Korrosion von Stahl in
Leichtbeton - dreijährige Auslagerung.
Bericht Nr. 1179 vom 10.5.1976, Institut für Massivbau,
TU München
- /6/ Schießl : Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforder-
lichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer
Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons.
Heft 255, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Berlin 1976
- /7/ Christlmeier, Müller : Einfluß der Rißbreite auf die Korrosion von Stahl in
Leichtbeton - Ergebnisse nach sechsjähriger Auslagerung.
Bericht Nr. 1112, März 1980, Institut für Bauingenieur-
wesen III, Lehrstuhl für Massivbau, TU München

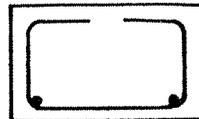
- Betonarten:

- L1: Leichtsand, Blähton
- L2: Leichtsand, Blähschiefer
- L3: Natursand, Blähton
- N : Normalbeton

- Querschnitte der Versuchskörper



Plattentyp



Balkentyp

- Betondeckungen:

	Längsbewehrung		Querbewehrung	
	unten	seitlich	unten	seitlich
P1	1,5	6,1	2,3	2,5
P2	2,5	6,1	2,5	3,3
B1	2,6	2,6	1,5	1,5
B2	3,6	3,6	2,5	2,5

- Anzahl der Versuchsbalken

	L1	L2	L3	N
P1	2	-	-	2
P2	2	-	-	2
B R [⊗]	2	2	2	2
B M [⊗]	2	-	-	-
B2	2	-	-	-

⊗) R = Rheinhausen

M = München

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR BAUINGENIEURWESEN III
LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU
O. PROF. DR.-ING. HERBERT KUPFER
Nr. 1239/He/K

8000 MÜNCHEN 2 , 2.9.1985
Arcisstraße 21
Postfach 202420
Tel. (089) 2105-3029
Telex 522854 2105-3031

Einfluß der Rißbreite auf die Korrosion von Stahl in Leichtbeton

Teil III

Ergebnisse nach 11jähriger Auslagerungsdauer

Bericht erstattet von

Dipl.-Ing. M. Hergenröder

Dipl.-Ing. H.H. Müller

ANLAGEN

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht werden.
Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf
der vorherigen Genehmigung des Instituts für Massivbau.

INHALTSVERZEICHNIS DER ANLAGEN

<u>Tabelle</u>		Anlage
15	: Chemische Analyse des Zements	1
16	: Betonkenndaten, Leichtbeton L1	2
17	: " , " L2	3
18	: " , " L3	4
19	: " , Normalbeton N	5
20	: Festigkeitseigenschaften, BSt 420/500 RU, ϕ 8 mm	8
21	: Chemische Zusammensetzung, BSt 420/500 RU, ϕ 8 mm	8
22	: Rippung, BSt 420/500 RU, ϕ 8 mm	8
23	: Auslagerungs- und Entnahmedaten für die Balken	9-10
24	: Gemessene Betondeckungen	13-14
25	: Häufigkeit von Korrosion der Bewehrung an RiBstellen	15
26	: Häufigkeit der Korrosion an der Querbewehrung	19
27	: Anteil der korrodierten Staboberfläche und der Rostgrade bei der Bewehrung der Zwischenstücke	19
28	: Ergebnisse der Zugversuche - Einzelwerte	28
29	: Ergebnisse der Zugversuche - Mittelwerte	29
 <u>Bild</u>		
36	: Festigkeitsentwicklung L1	2
37	: " L2	3
38	: " L3	4
39	: " Normalbeton N	5
40	: Abmessungen der Versuchskörper	6
41	: Belastungsanordnung der Versuchskörper	7
42-51	: RiBbreiten vor und nach 11jähriger Auslagerung	11-12
52-61	: Häufigkeit der Korrosion an RiBstellen - Längsbewehrung	16-18
62-71	: Rostgrade an der Längsbewehrung	20

<u>Bild</u>	Anlage
72-81 : Querschnittsschwächung der Längsbewehrung	21-22
82-91 : Summenhäufigkeitsdiagr., Querschnittsschwächung der Längsbew.	23-24
92-100: Rostgrade an der Bewehrung	25
101-110: Querschnittsschwächung der Querbewehrung	26-27
111 : Bruchdehnung	30
112-113: Dauerschwingversuchsergebnisse	31

Zu den Anlagen 20 bis 27

Anl.		P1		P2		B1					B2
		L1	N	L1	N	L1	L1/M	L2	L3	N	L1
20	Rostgrade Längsbew.	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
21	ΔA Längsbew.	72	73	74	75						
22						76	77	78	79	80	81
23	Summenhäufigkeiten ΔA Längsbew.	82	83	84	85						
24						86	87	88	89	90	91
25	Rostgrade Querbew.	92	93		94	95	100	96	97	98	99
26	ΔA Querbew.	101	102	103	104						
27						105	110	106	107	108	109

Eigenschaften des Zements

Tabelle 15: Chemische Analyse (Werksangabe)

PZ 350 F - Harburg, Zeitpunkt der Lieferung Juli 1971			
Verbindung	% Anteile, glvf.	Verbindung	
Glühverlust/CO ₂	(1,82)	Silikat Modul	2,4
Unlösliches	0,96	Tonerde Modul	1,8
SiO ₂	19,97	Kalksättigung	93,6
Al ₂ O ₃	5,30	% C ₃ S	52,54
Fe ₂ O ₃	2,96	% C ₂ S	17,68
CaO	65,25	% C ₃ A	9,03
MgO	1,03	% C ₄ AF	8,99
SO ₃	3,66	% CaO frei	2,68
TiO ₂	0,03	% CaSO ₄	6,22
K ₂ O	0,60	% Rest	2,86
Na ₂ O	0,14		
Rest	0,10		
Summe	100,00		

Normendruckfestigkeit nach DIN 1164: 42,8 N/mm²

Biegezugfestigkeit 7,1 N/mm²

LEICHTBETON L1 (Liapor mit Liasand)

Tabelle 16: Betonkennwerten

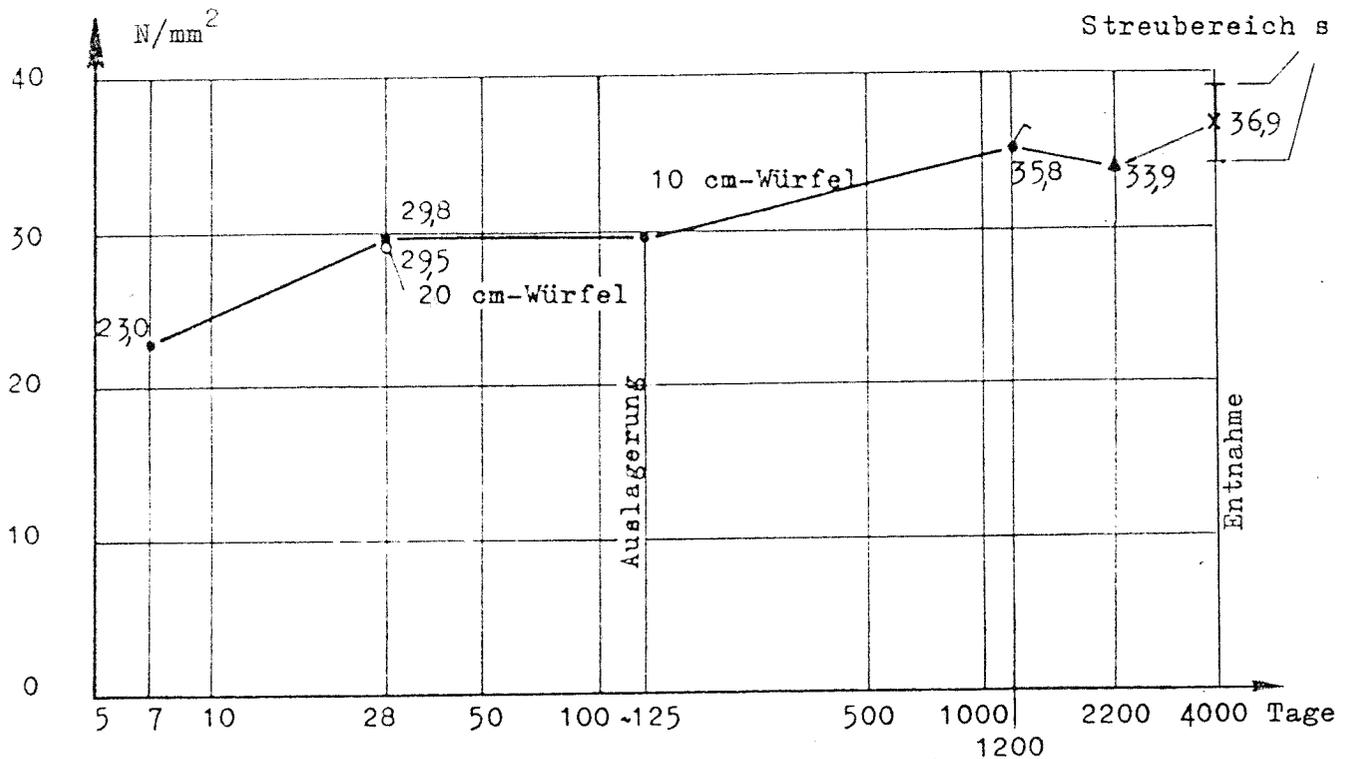
Betonzusammensetzung in kg/m ³ verdichteten Betons					Verd.- maß nach Walz v	28-Tage Rohdichte ρ ₂₈ kg/dm ³	Würfel- druck- festigkeit B _{w28} N/mm ²
Zement PZ 35 F	wirksames Wasser Saugwasser	Liasand 0/4 mm	Liapor F5 4/8 mm	Liapor G5 8/16 mm			
300	150	326	243	243	1,18 ⁺ (3,9%)	1,35 ^x (3,1%)	29,8 ^x (6%)
	107						

x Mittelwerte aus 63 Probewürfeln (20 cm Kantenlänge)

+ Mittelwert aus 12 Mischungen, gemessen 5 min nach Mischen

() Variationskoeffizient

Bild 36: Festigkeitsentwicklung



- Mittelwerte aus jeweils 9 Würfeln (10 cm)
 - Mittelwert aus 18 Würfeln (10 cm)
 - Mittelwert aus 9 Würfeln (20 cm)
 - ▲ Mittelwert aus 30 Würfeln (10 cm)
 - × Mittelwert aus 12 Würfeln (10 cm)
- } 2 Mischungen

LEICHTBETON L2 (Berwilit mit Leichtsand)

Tabelle 17: Betonkenndaten

Zement PZ 35 F	Betonzusammensetzung in kg/m ³ verdichteten Betons				Verd.- maß nach Walz v	28-Tage Rohdichte S ₂₈ kg/dm ³	Würfel- druck- festigkeit B _{w28} N/mm ²
	wirksames Wasser Saugwasser	Berwilit 0/4 mm	Berwilit 4/8 mm	Berwilit 8/16 mm			
300	150	370	320	270	1,25 ⁺	1,46 ^x	32,8 ^x
	70					(1,4%)	(3,4%)

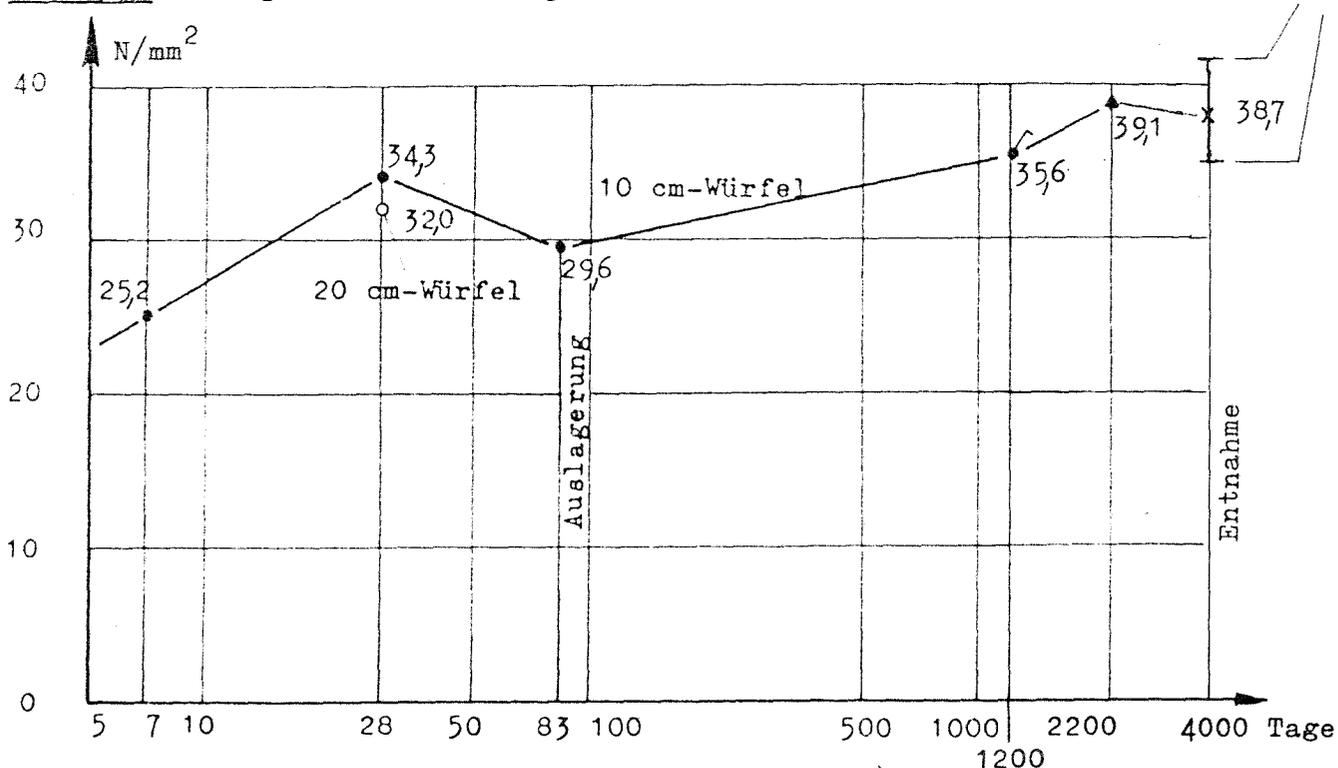
x Mittelwerte aus 12 Probewürfeln (20 cm Kantenlänge)

+ Mittelwert aus 4 Mischungen, gemessen 5 min nach Mischen
 (max v = 1,29, min v = 1,22)

() Variationskoeffizient

Bild 37: Festigkeitsentwicklung

Streubereich s



- Mittelwert aus jeweils 3 Würfeln (10 cm)
 - " " 5 Würfeln (10 cm)
 - " " 3 Würfeln (20 cm)
 - ▲ " " 6 Würfeln (10 cm)
 - x " " 5 Würfeln (10 cm)
- } 2 Mischungen

LEICHTBETON L3 (Liapor mit Natursand)

Tabelle 18 : Betonkennwerten

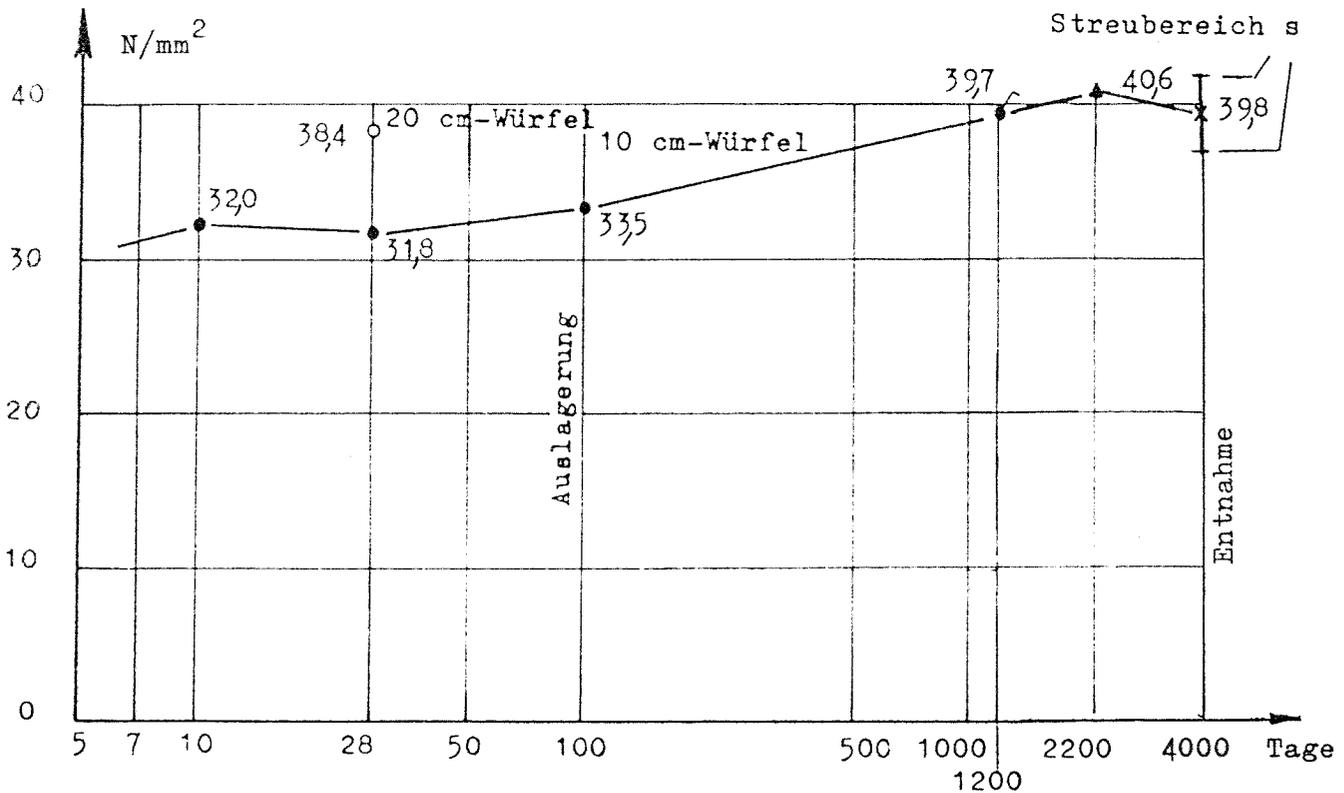
Betonzusammensetzung in kg/m ³ verdichteten Betons					Verd.- maß nach Walz v	28-Tage Rohdichte S ₂₈ kg/dm ³	Würfeldruck- festigkeit B _{w28} N/mm ²
Zement PZ 35 F	wirksames Wasser Saugwasser	Natur- sand 0/3 mm	Liapor P5 4/8 mm	Liapor G5 8/16 mm			
300	150	550	242	242	1,22 ⁺	1,58 ^x (0,9%)	37,5 ^x (3,7%)
	68						

x Mittelwerte aus 12 Probewürfeln (20 cm Kantenlänge)

+ Mittelwert aus 4 Mischungen, gemessen 5 min nach Mischen
 (max v = 1,24, min v = 1,21)

() Variationskoeffizient

Bild 38: Festigkeitsentwicklung



- Mittelwerte aus jeweils 3 Würfeln (10 cm)
 - Mittelwert aus 6 Würfeln (10 cm)
 - Mittelwert aus 3 Würfeln (20 cm)
 - ▲ Mittelwert aus 6 Würfeln (10 cm)
 - × Mittelwert aus 5 Würfeln (10 cm)
- } 2 Mischungen

NORMALBETON N

Tabelle 19: Betonkenndaten

Betonzusammensetzung in kg/m ³ verdichteten Betons					Verd.- maß nach Walz v	28-Tage Rohdichte S ₂₈ kg/dm ³	Würfel- druck- festigkeit B _{w28} N/mm ²
Zement	Wasser	Rheinzuschläge Kornfraktionen					
PZ 35 F		0/3 mm	3/7 mm	7/15 mm			
240	180	750	565	565	1,25 ⁺ (4%)	2,29 ^x (0,7%)	33,1 ^x (8,1%)

x Mittelwerte aus 36 Probewürfeln (20 cm Kantenlänge)

+ Mittelwert aus 12 Mischungen

() Variationskoeffizient

Bild 39: Festigkeitsentwicklung

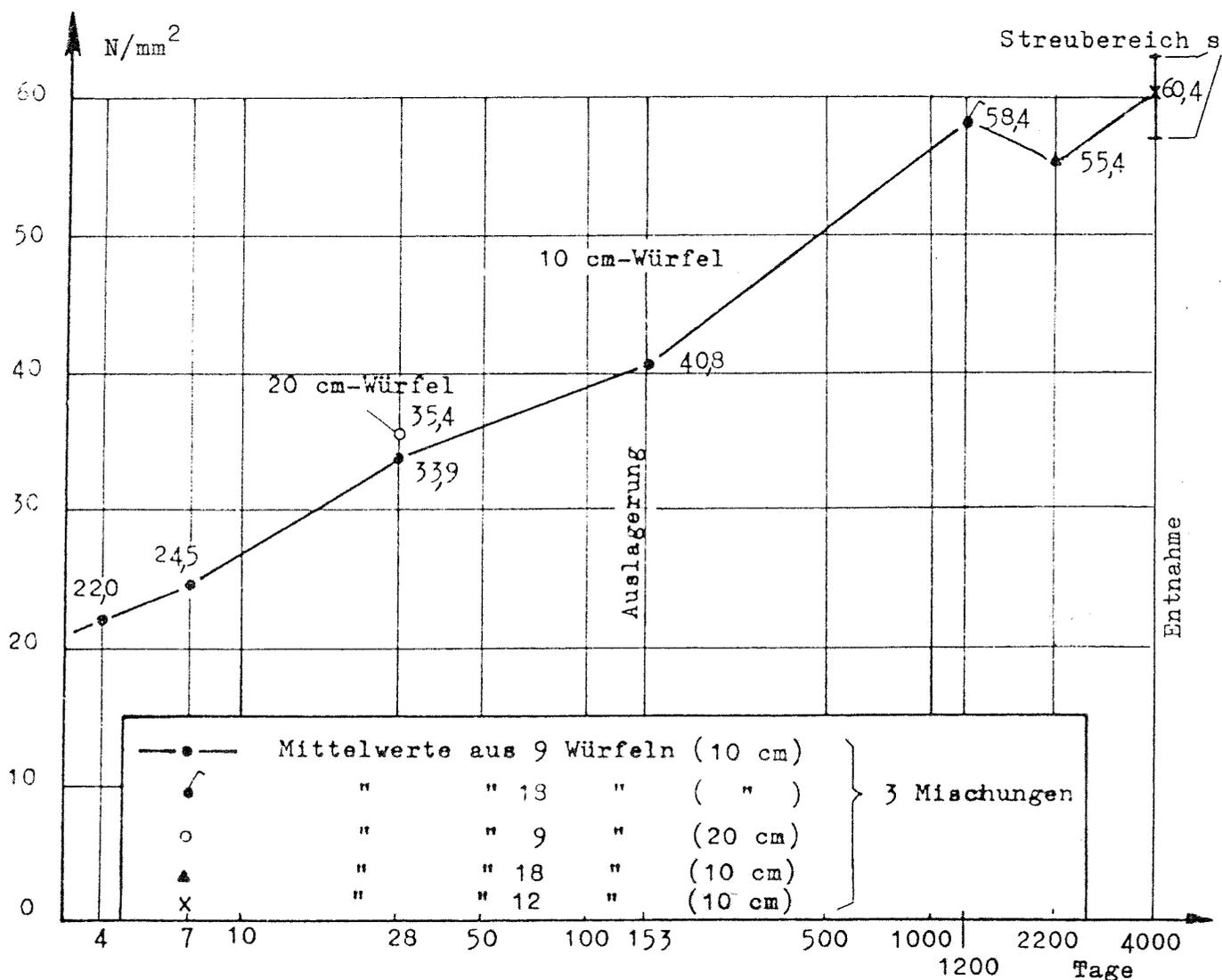


Bild 40 : Abmessungen der Versuchskörper

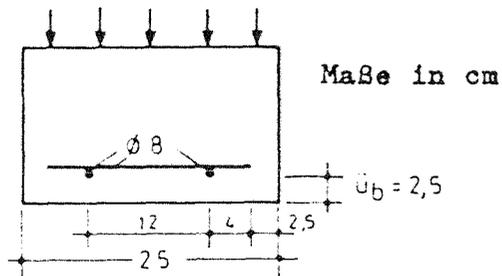
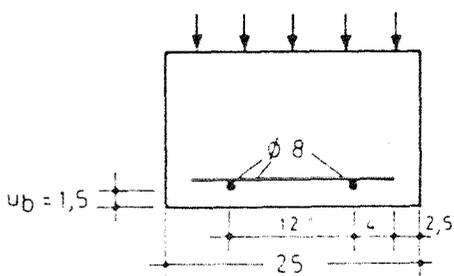
a) Platten

Typ P1

Typ P2

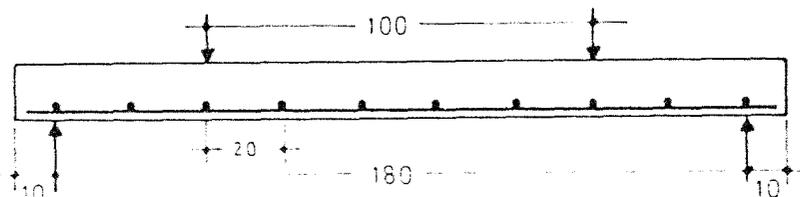
Betonierichtung

Betonierichtung



Maße in cm

Querstäbe a = 20



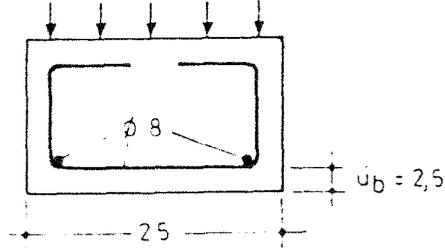
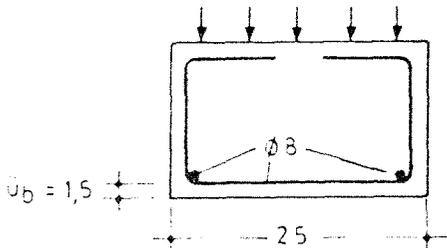
b) Balken

Typ B1

Typ B2

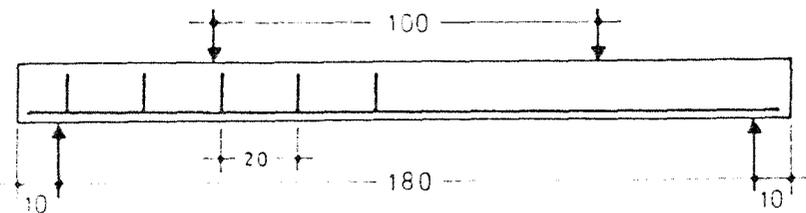
Betonierichtung

Betonierichtung

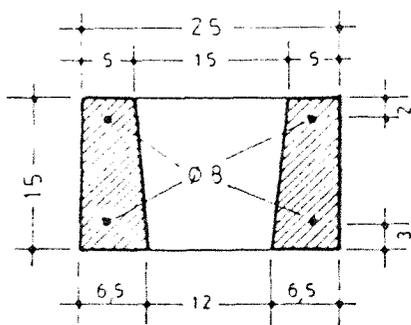


$\bar{u}_{\text{Bügel}}$ allseitig 1,5 cm

$\bar{u}_{\text{Bügel}}$ allseitig 2,5 cm



c) Zwischenstücke



Draufsicht

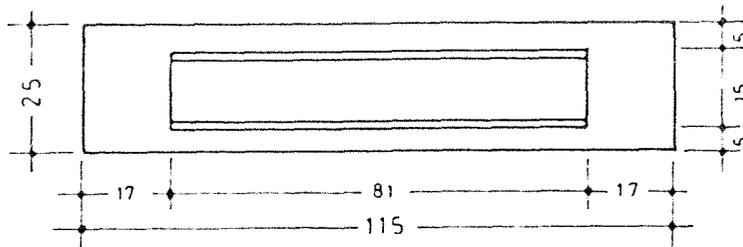
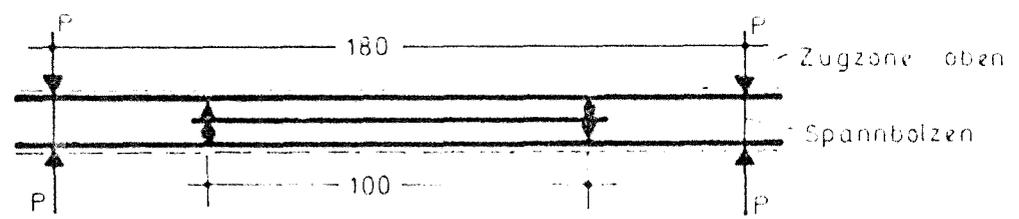
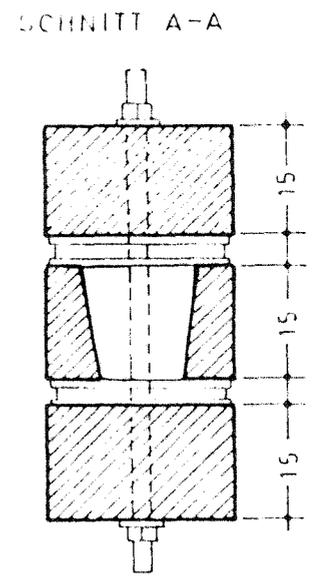
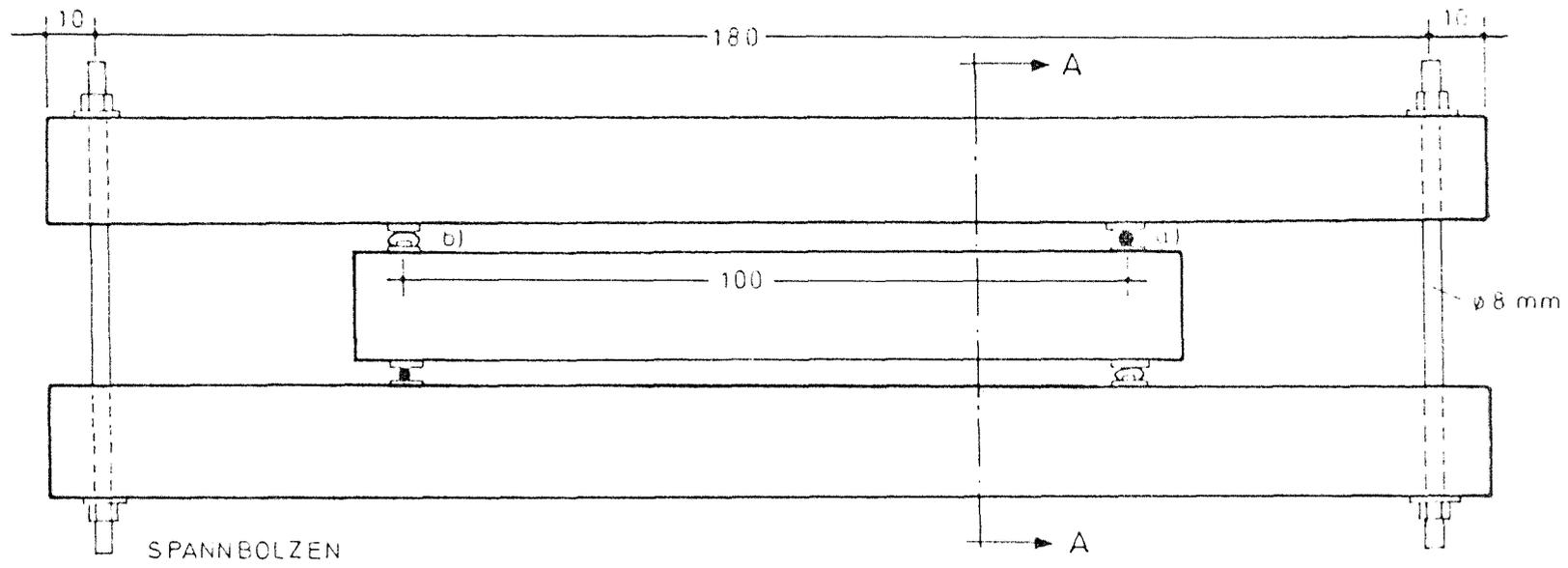


Bild 41: Belastungsanordnung der Versuchskörper



Einzelheit:

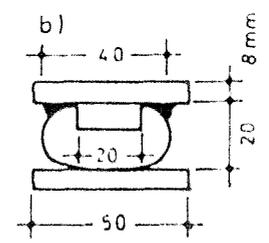
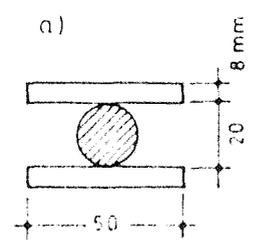


Tabelle 20: Festigkeitseigenschaften, BSt 420/500 RU, ϕ 8 mm

	d_e mm	F_e mm ²	B_S N/mm ²	B_Z N/mm ²	δ_{10} %
Vers. Nr. 1	8,15	52,11	518,2	736,9	23,0
Vers. Nr. 2	8,14	52,10	522,0	740,8	20,9
Vers. Nr. 3	8,20	52,84	511,0	734,4	21,5
Mittelwerte	8,16	52,35	517,1	737,4	21,8

Tabelle 21: Chemische Zusammensetzung, BSt 420/500 RU, ϕ 8 mm

	C	Si	Mn	P	S	Cr
[%]	0,39	0,80	1,04	0,050	0,030	0,36

Tabelle 22: Rippung, BSt 420/500 RU, ϕ 8 mm

(Bezeichnung nach DIN 488 vom April 1972)

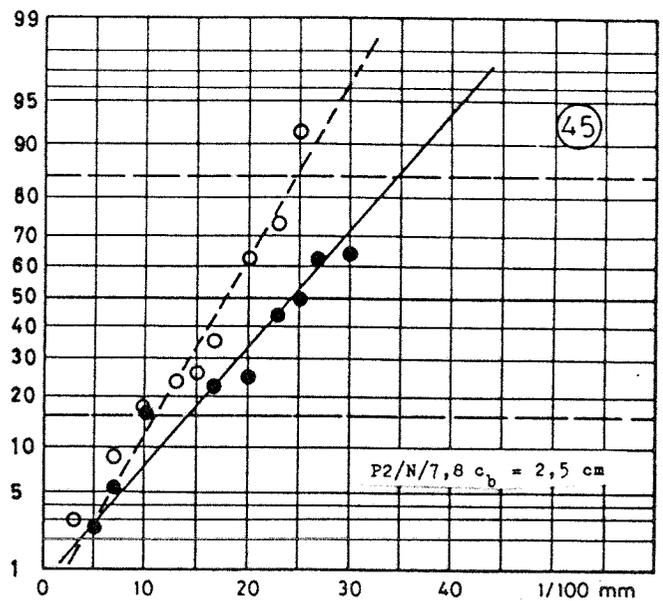
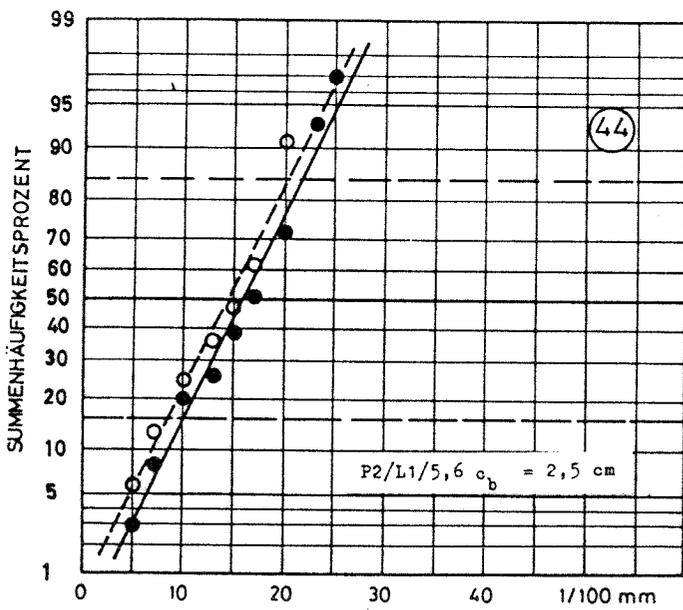
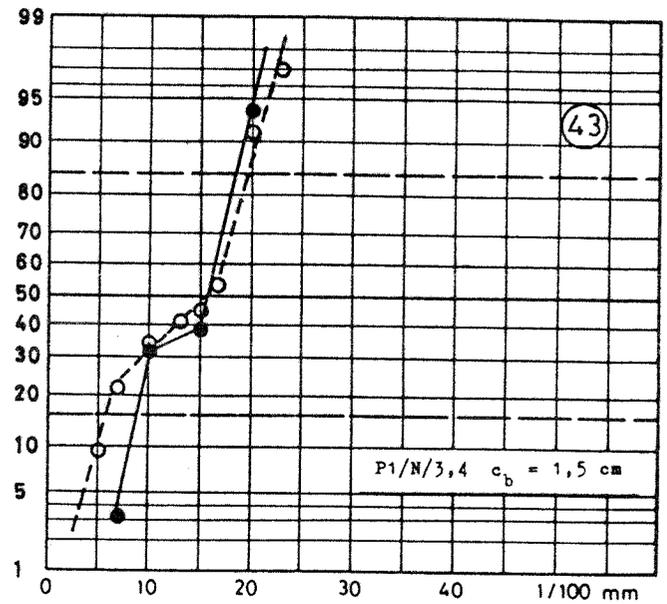
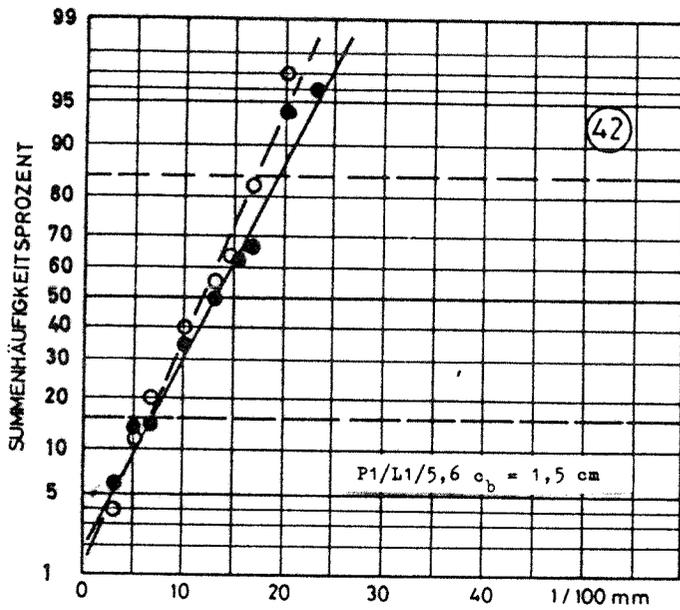
Nenn- ϕ d_e mm	Kern- ϕ d_k mm	Schrägrippen					Längsrippen		f_R
		a_s mm	a_{sv} mm	b_s mm	c_s mm	β Grad	a_1 mm	b_1 mm	
8,16	7,7	0,67	0,45	0,8	5,3	43	0,85	1,7	0,062

Tabelle 23: Auslagerungs- und Entnahmedaten für die Balken

Balken/Beton/Balkenr.	Herstellung	Auslagerung	Entnahme
P1 / L1 / 1,2	10.09.71	09.12.71	04.10.77
P1 / L1 / 3,4	15.09.71	10.12.71	
P1 / L1 / 5,6	20.09.71	11.12.71	07.10.82
P1 / L1 / 7,8	23.09.71	08.12.71	04.10.77
P1 / L1 / 9,10	28.09.71	11.12.71	22.10.74
P1 / N / 1,2	02.09.71	13.12.71	22.10.74
P1 / N / 3,4	07.09.71	14.12.71	07.10.82
P1 / N / 5,6	01.10.71	09.12.71	05.10.77
P1 / N / 7,8	06.10.71	14.12.71	
P2 / L1 / 1,2	10.09.71	09.12.71	
P2 / L1 / 3,4	15.09.71	10.12.71	22.10.74
P2 / L1 / 5,6	20.09.71	10.12.71	07.10.82
P2 / L1 / 7,8	23.09.71	08.12.71	05.10.77
P2 / N / 1,2	29.09.71	14.12.71	24.10.74
P2 / N / 3,4	07.09.71	14.12.71	
P2 / N / 5,6	28.09.71	09.12.71	05.10.77
P2 / N / 7,8	06.10.71	10.12.71	07.10.82
B1 / L1 / 1,2	11.10.71	11.12.71	
B1 / L1 / 3,4	11.10.71	11.12.71	05.10.77
B1 / L1 / 5,6	13.10.71	12.12.71	05.10.77
B1 / L1 / 7,8	15.10.71	12.12.71	23.10.74
B1 / L1 / 9,10	20.10.71	11.12.71	07.10.82
B1 / L2 / 1,2	11.11.71	13.12.71	06.10.77
B1 / L2 / 3,4	16.11.71	14.12.71	23.10.74
B1 / L2 / 5,6	16.11.71	11.12.71	07.10.82
B1 / L2 / 7,8	16.11.71	11.12.71	

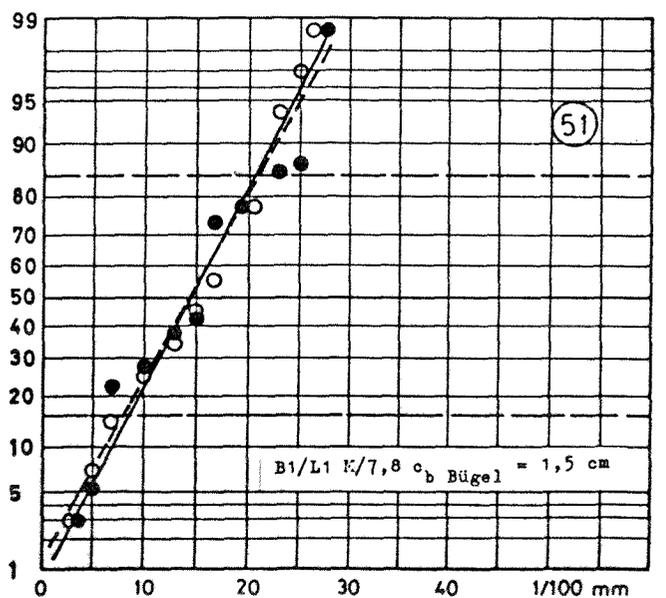
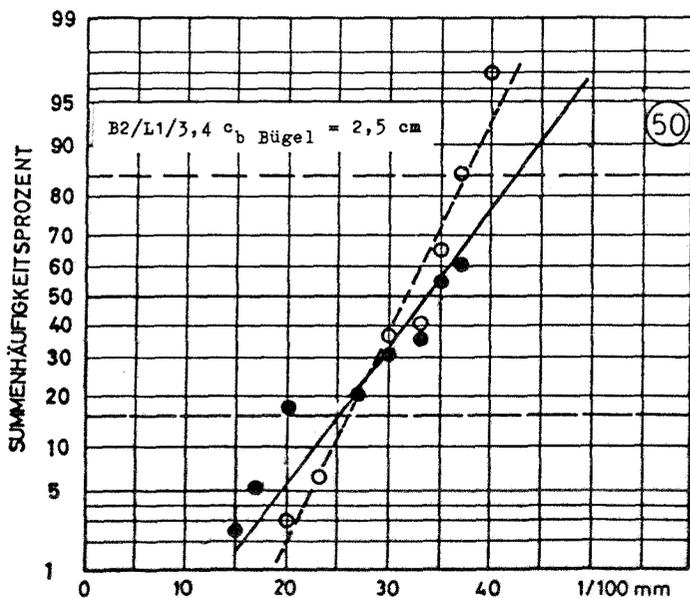
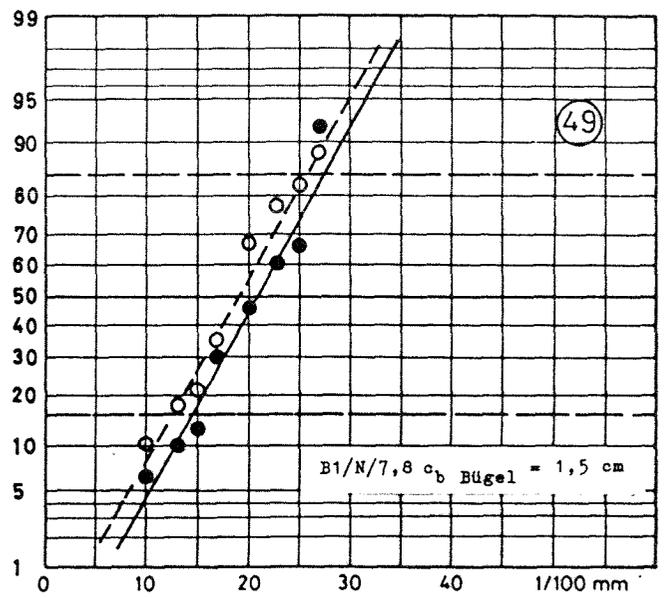
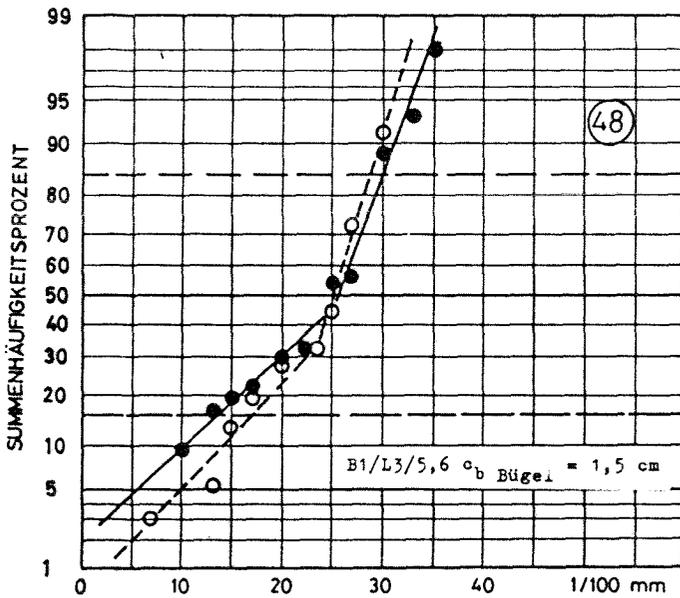
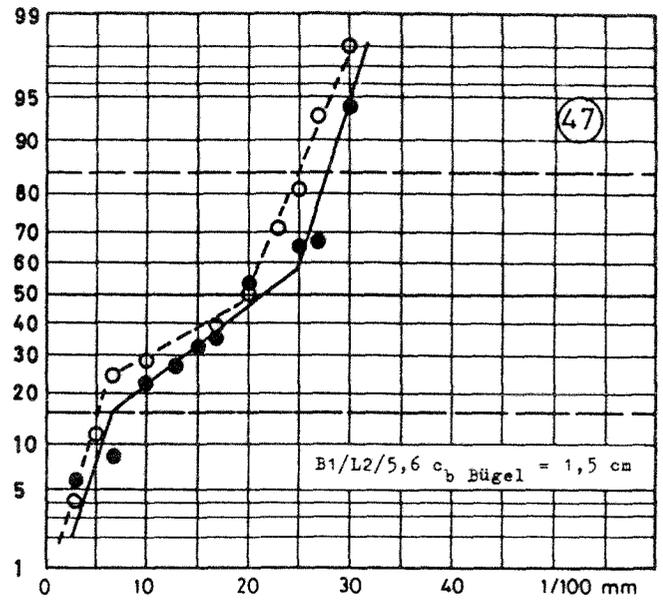
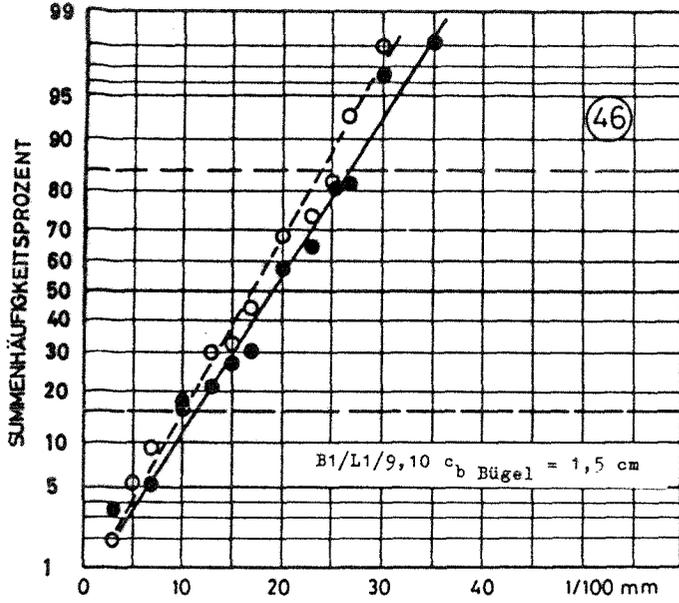
Tabelle 23: Fortsetzung

Balken/Beton/Balkennr	Herstellung	Auslagerung	Entnahme
B1 / L3 / 1,2	25.10.71	13.12.71	23.10.74
B1 / L3 / 3,4	25.10.71	13.12.71	
B1 / L3 / 5,6	28.10.71	12.12.71	07.10.82
B1 / L3 / 7,8	28.10.71	08.12.71	04.10.77
B1 / N / 1,2	03.11.71	14.12.71	23.10.74
B1 / N / 3,4	03.11.71	13.12.71	05.10.77
B1 / N / 5,6	08.11.71	14.12.71	
B1 / N / 7,8	08.11.71	10.12.71	07.10.82
B2 / L1 / 1,2	19.11.71	12.12.71	06.10.77
B2 / L1 / 3,4	19.11.71	12.12.71	07.10.82
B2 / L1 / 5,6	24.11.71	10.12.71	
B1 / L1M / 1,2	20.10.71	31.08.72	
B1 / L1M / 3,4	24.11.71	25.06.74	
B1 / L1M / 5,6	06.04.72	-	-
B1 / L1M / 7,8	06.04.72	25.06.74	13.09.82



---○--- Meßwerte vor der Auslagerung
 —●— Meßwerte nach der Auslagerung

Bilder 42 - 45: Summenhäufigkeit der Rißbreiten vor und nach 11jähriger Auslagerung
 Jedes Bild zeigt die Ergebnisse für ein Balkenpaar



Bilder 46 - 51: Summenhäufigkeit der Rißbreiten vor und nach
 11jähriger Auslagerung
 Jedes Bild zeigt die Ergebnisse für ein Balkenpaar

Gemessene Betondeckungen

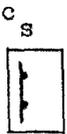
Tabelle 24: Längsstäbe an Rißstellen

Balken- typ	Stahl	Beob.- stelle	Anzahl der Messungen	c _{soll} cm	c _m cm	c _{max} cm	c _{min} cm	s cm	v %
P1/L1/ 5,6	a+b	I,IV	66	6,1	5,8	6,2	5,0	0,35	6,0
		II,III	114	1,5	1,8	2,3	1,5	0,18	9,7
	Ver- teiler	I,IV	-	2,5	-	-	-	-	-
		II,III	40	2,3	2,8	3,0	2,3	0,17	6,0
P1/N/ 3,4	a+b	I,IV	67	6,1	6,0	6,7	5,1	0,39	6,5
		II,III	68	1,5	1,6	1,8	1,3	0,15	9,1
	Ver- teiler	I,IV	10	2,5	2,5	2,7	2,3	0,14	5,5
		II,III	30	2,3	2,5	2,8	2,2	0,15	6,1
P2/L1/ 5,6	a+b	I,IV	101	6,1	6,0	6,9	5,2	0,40	6,8
		II,III	101	2,5	2,8	3,2	2,3	0,26	9,4
	Ver- teiler	I,IV	10	2,5	3,4	3,6	3,1	0,17	5,1
		II,III	30	3,3	3,7	4,0	3,3	0,25	6,8
P2/N/ 7,8	a+b	I,IV	69	6,1	6,0	7,2	5,0	0,58	9,6
		II,III	69	2,5	2,7	3,2	2,3	0,30	11,0
	Ver- teiler	I,IV	10	2,5	3,4	3,5	3,2	0,10	2,9
		II,III	30	3,3	3,7	4,2	3,2	0,28	7,4
B1/L1/ 9,10	a+b	I,IV	69	2,6	2,5	2,9	2,0	0,19	7,7
		II,III	71	2,6	3,1	2,8	3,3	0,12	3,8
	Ver- teiler	I,IV	20	1,5	1,5	1,6	1,2	0,12	8,3
		II,III	20	1,5	2,0	2,3	1,7	0,14	6,8
B1/L2/ 5,6	a+b	I,IV	67	2,6	2,8	3,1	2,4	0,23	8,5
		II,III	67	2,6	3,0	3,4	2,7	0,16	5,2
	Bügel	I,IV	20	1,5	1,6	1,5	2,0	0,16	10,2
		II,III	20	1,5	1,7	1,0	2,0	0,38	22,4

Tabelle 24: Fortsetzung

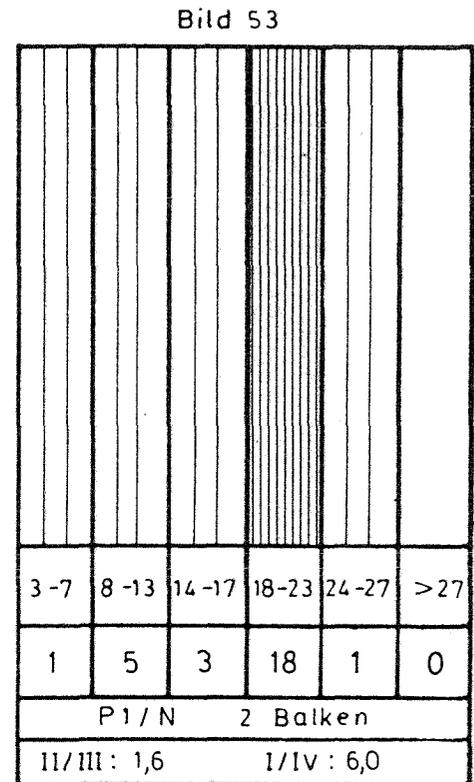
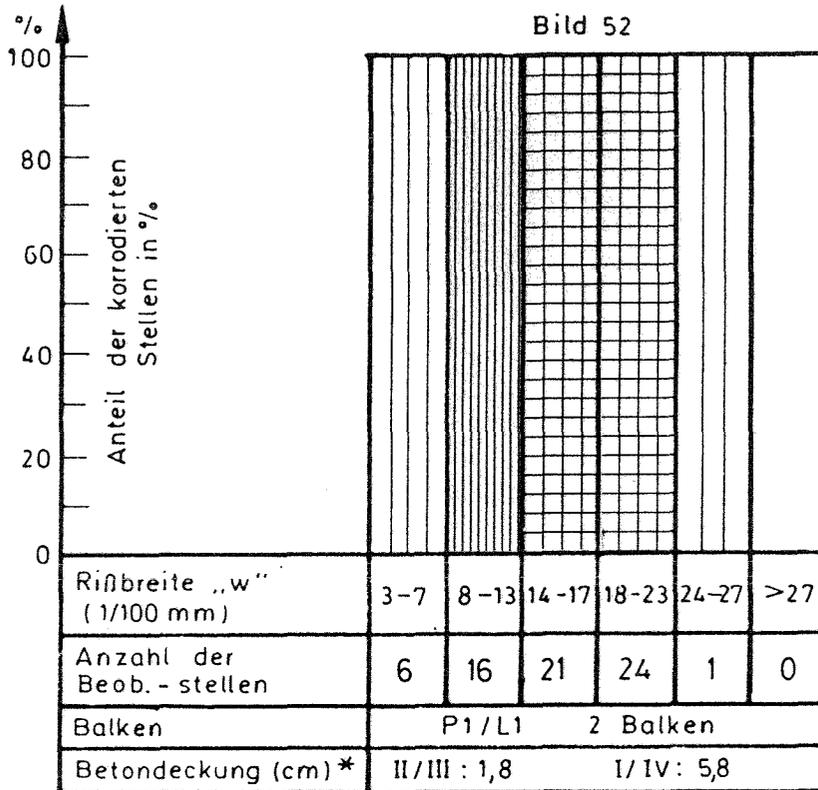
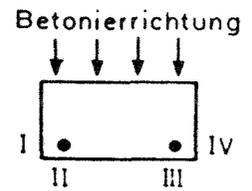
Balken- typ	Stahl	Beob.- stelle	Anzahl der Messungen	c _{soll} cm	c _m cm	c _{max} cm	c _{min} cm	s cm	v %
B1/L3/ 5,6	a+b	I,IV	61	2,6	2,6	2,8	2,1	0,14	5,6
		II,III	61	2,6	2,7	2,9	2,4	0,15	5,4
	Bügel	I,IV	20	1,5	1,5	1,9	1,2	0,18	11,9
		II,III	20	1,5	1,6	1,8	1,3	0,16	10,0
B1/N/ 7,8	a+b	I,IV	48	2,6	2,7	3,1	2,5	0,17	6,1
		II,III	48	2,6	2,6	2,8	2,3	0,14	5,6
	Bügel	I,IV	20	1,5	1,5	2,0	1,1	0,20	13,4
		II,III	20	1,5	1,5	1,8	1,3	0,12	8,1
B1/L1M/ 7,8	a+b	I,IV	84	2,6	2,4	2,8	2,0	0,19	7,8
		II,III	85	2,6	2,9	3,4	2,5	0,25	8,4
	Bügel	I,IV	20	1,5	1,4	1,7	1,0	0,22	16,4
		II,III	20	1,5	1,9	2,4	1,6	0,18	9,6
B2/L1/ 3,4	a+b	I,IV	51	3,6	3,6	4,0	3,3	0,17	4,7
		II,III	56	3,6	4,0	3,7	4,4	0,14	3,5
	Ver- teiler	I,IV	20	2,5	2,3	2,6	2,0	0,14	6,2
		II,III	20	2,5	3,2	3,7	2,9	0,17	5,1

Tabelle 25: Häufigkeit von Korrosion der Bewehrung an Rißstellen im Beton

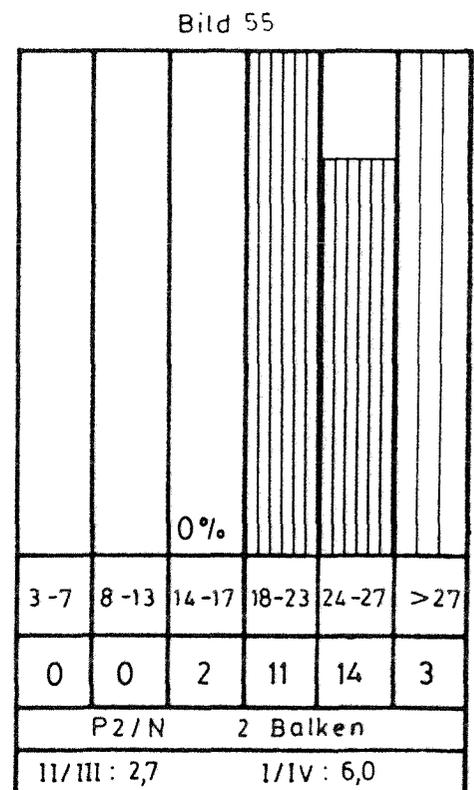
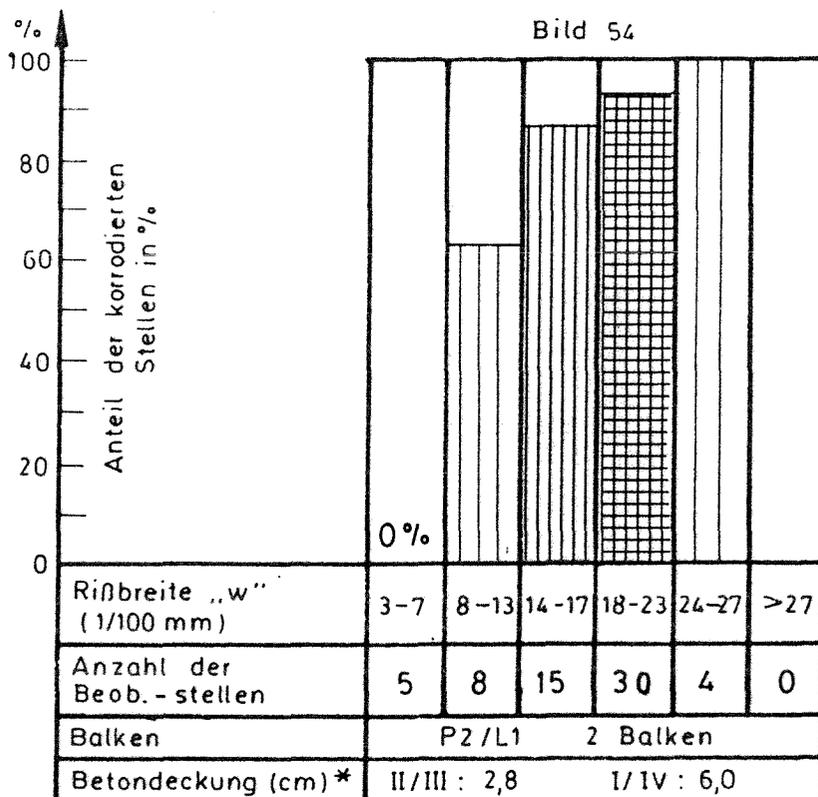
Balkentyp c  c_s	Längsbewehrung								
	Risse an Bügeln bzw. Querstäben			Risse außerhalb von Bügeln bzw. Querstäben			Rißstellen insgesamt		
	Anzahl	korrodiert	rostfrei	Anzahl	korrodiert	rostfrei	Anzahl	korrodiert	rostfrei
P1/L1 $c = 1,5 \text{ cm}; c_s = 5,9 \text{ cm}$	19	17 (100%)	0	51	51 (100%)	0	68	68 (100%)	0
P1/N $c = 1,5 \text{ cm}; c_s = 5,9 \text{ cm}$	20	20 (100%)	-	8	8 (100%)	0	28	28 (100%)	0
P2/L1 $c = 2,5 \text{ cm}; c_s = 5,9 \text{ cm}$	2	2 (100%)	-	59	47 (80%)	12 (20%)	61	49 (80%)	12 (20%)
P2/N $c = 2,5 \text{ cm}; c_s = 5,9 \text{ cm}$	8	8 (100%)	-	22	17 (77%)	5 (23%)	30	25 (83%)	5 (17%)
B1/L1 $c = 2,6 \text{ cm}; c_s = 2,6 \text{ cm}$	6	6 (100%)	-	51	46 (90%)	5 (10%)	57	52 (91%)	5 (9%)
B1/L1/M $c = 2,6 \text{ cm}; c_s = 2,6 \text{ cm}$	9	8 (89%)	1 (11%)	58	50 (86%)	8 (14%)	67	58 (87%)	9 (13%)
B1/L2 $c = 2,6 \text{ cm}; c_s = 2,6 \text{ cm}$	0	-	-	47	38 (81%)	9 (19%)	47	38 (81%)	9 (19%)
B1/L3 $c = 2,6 \text{ cm}; c_s = 2,6 \text{ cm}$	8	8 (100%)	-	33	31 (94%)	2 (6%)	41	39 (95%)	2 (5%)
B1/N $c = 2,6 \text{ cm}; c_s = 2,6 \text{ cm}$	12	9 (75%)	3 (25%)	18	16 (89%)	2 (11%)	30	25 (83%)	5 (17%)
B2/L1 $c = 3,5 \text{ cm}; c_s = 3,5 \text{ cm}$	4	4 (100%)	-	34	33 (97%)	1 (3%)	38	37 (97%)	1 (3%)

Bilder 52 - 55:

Rost an der Längsbewehrung
 Häufigkeit der Korrosion an Rißstellen
 in Abhängigkeit von der Rißbreite
 Versuchskörper P1 und P2



* vorhandene Mittelwerte



* vorhandene Mittelwerte

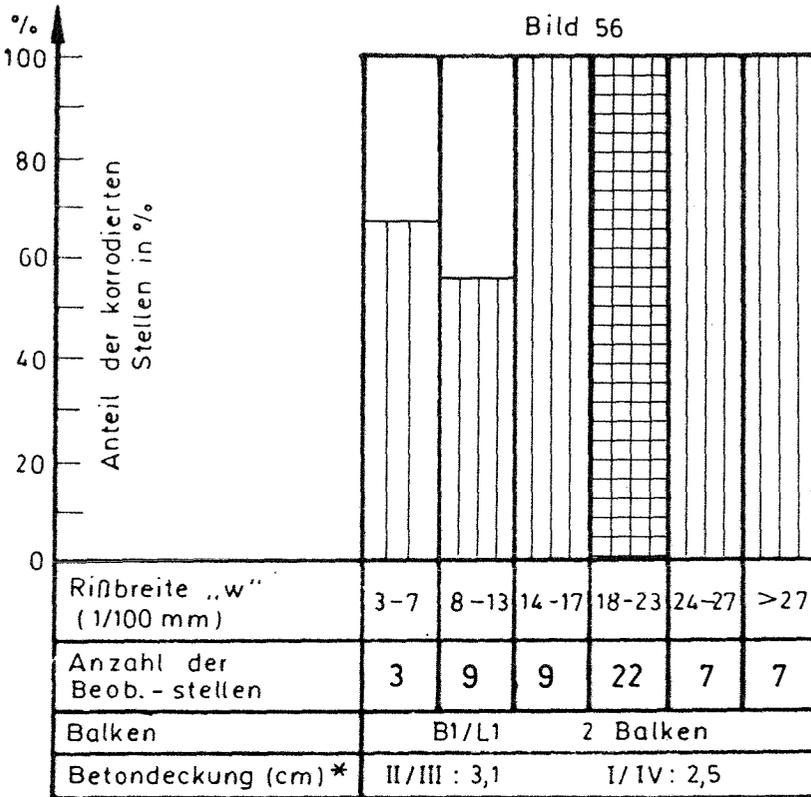
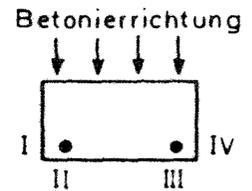
Bilder 56 - 59:

Rost an der Längsbewehrung

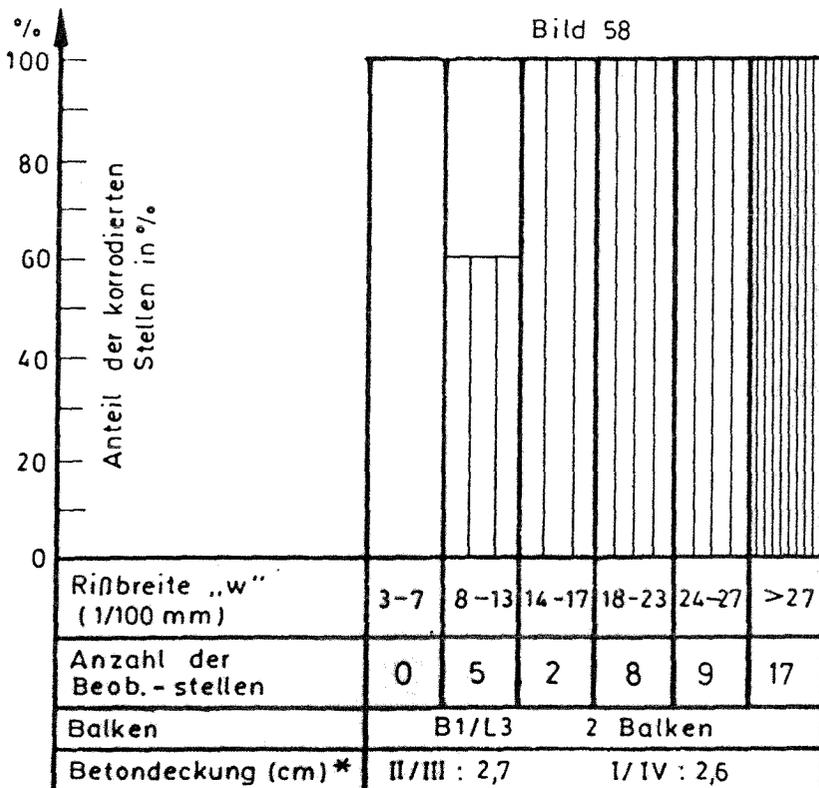
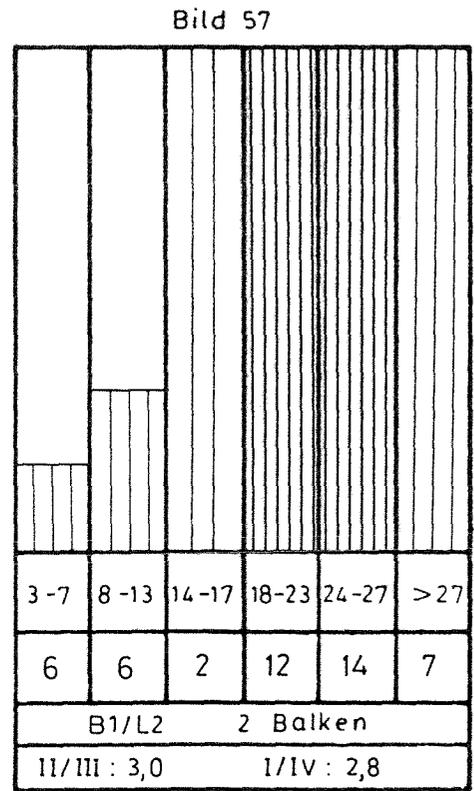
Häufigkeit der Korrosion an Rißstellen

in Abhängigkeit von der Rißbreite

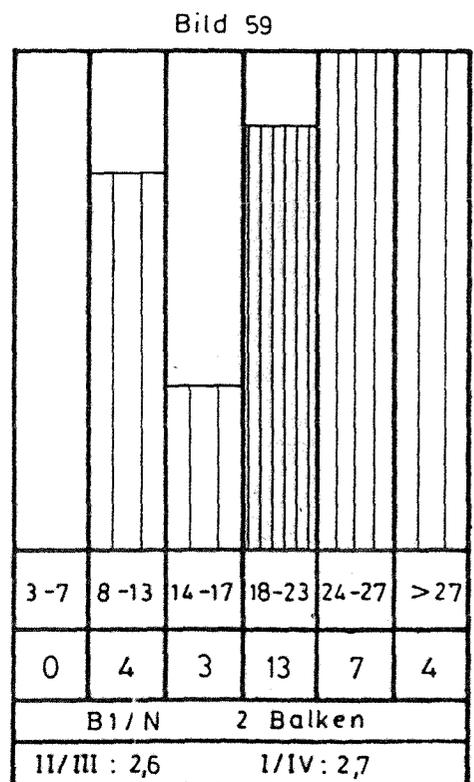
Versuchskörper B1



* vorhandene Mittelwerte



* vorhandene Mittelwerte



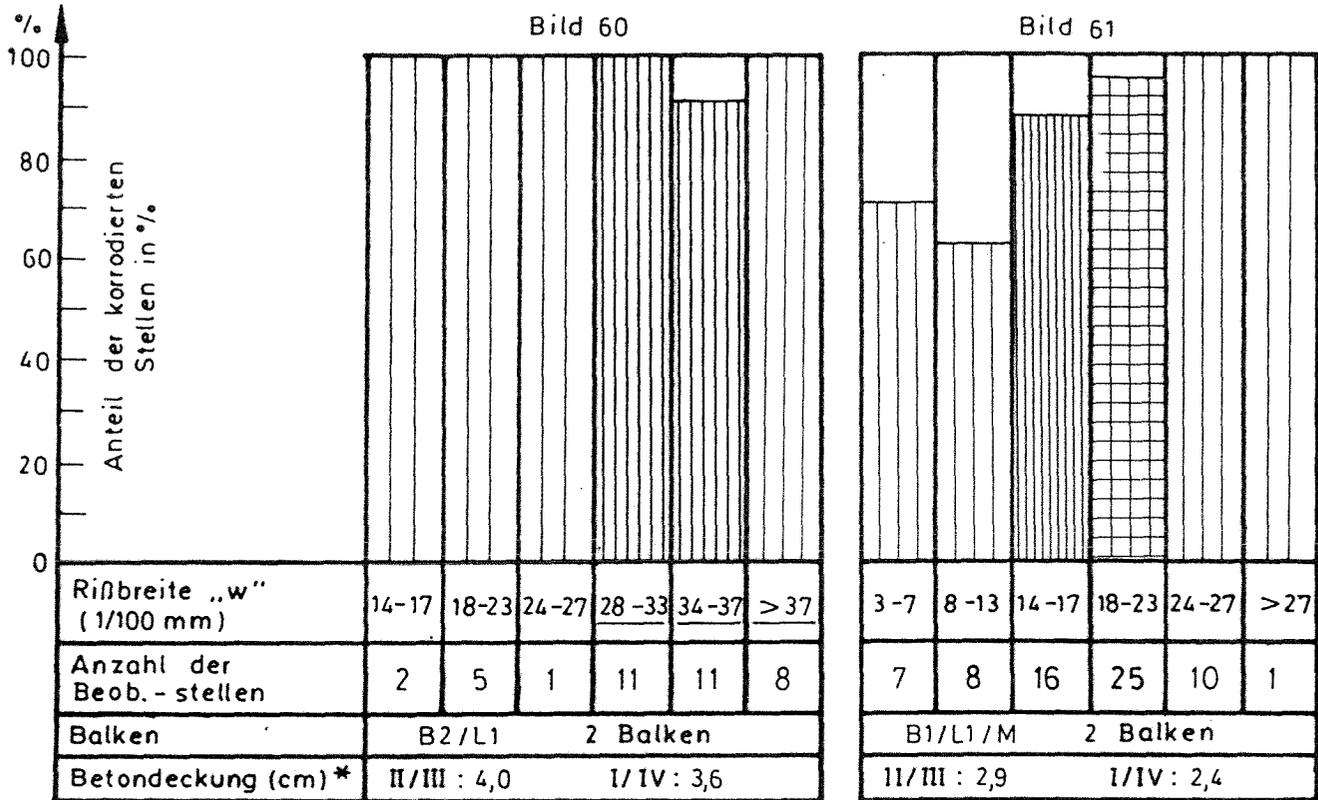
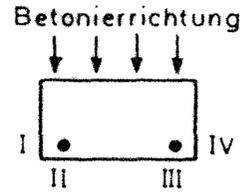
Bilder 60 - 61:

Rost an der Längsbewehrung

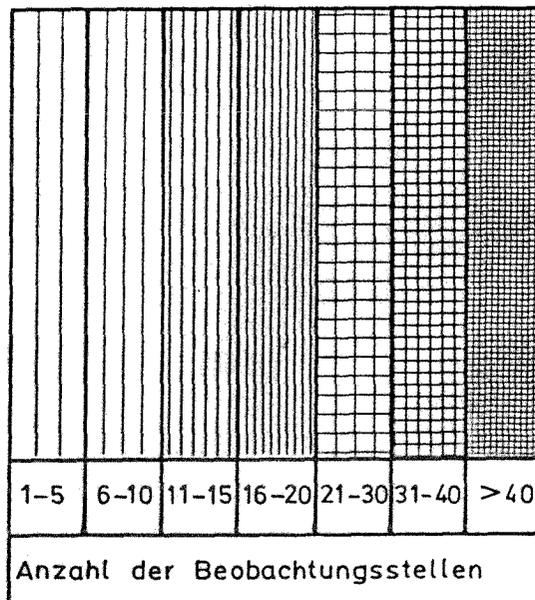
Häufigkeit der Korrosion an Rißstellen

in Abhängigkeit von der Rißbreite

Versuchskörper B2 und B1 M



* vorhandene Mittelwerte



Legende

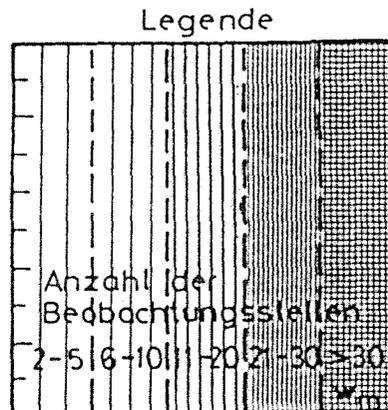
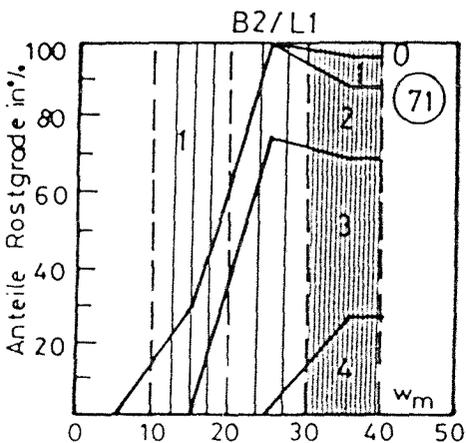
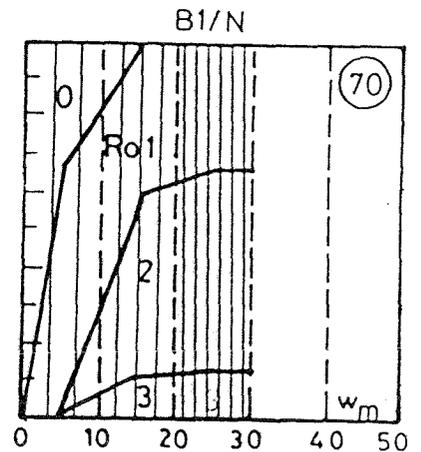
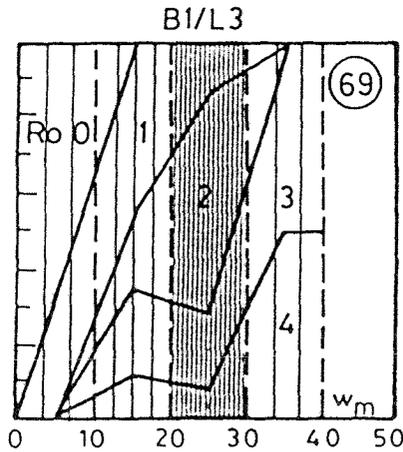
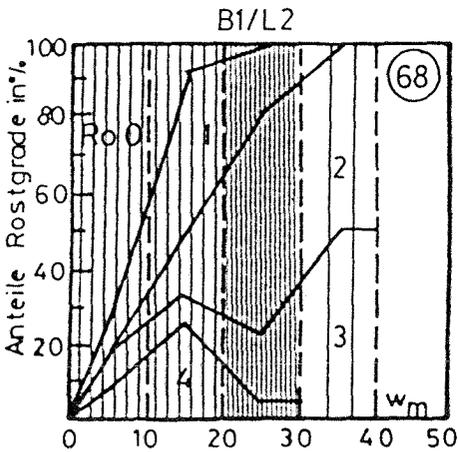
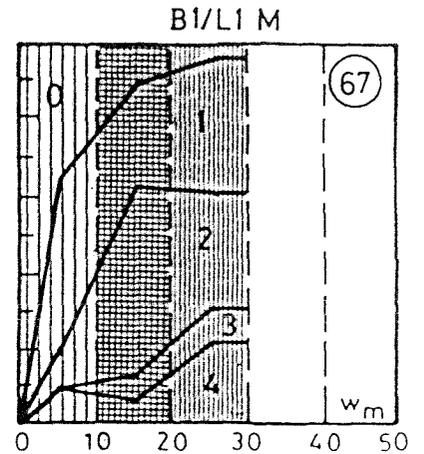
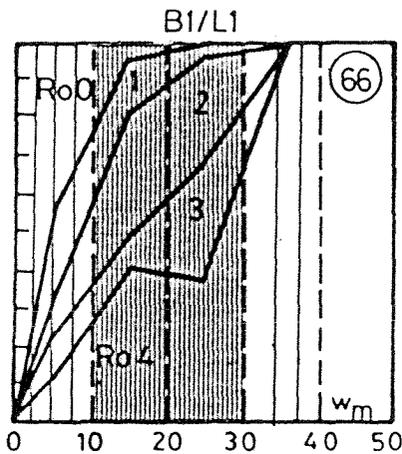
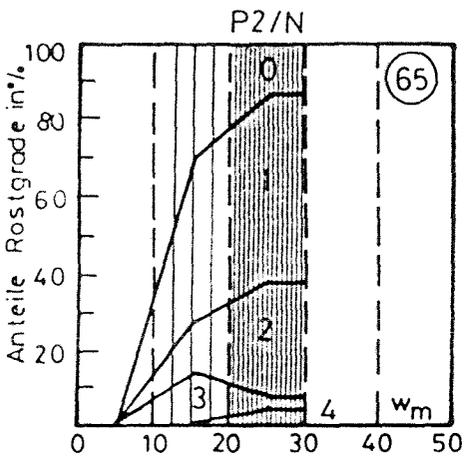
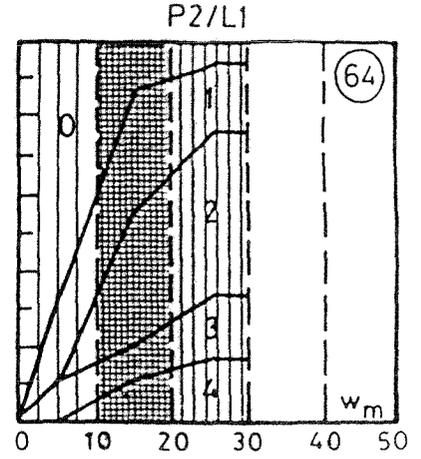
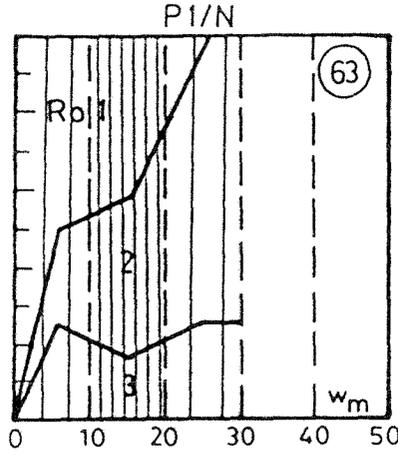
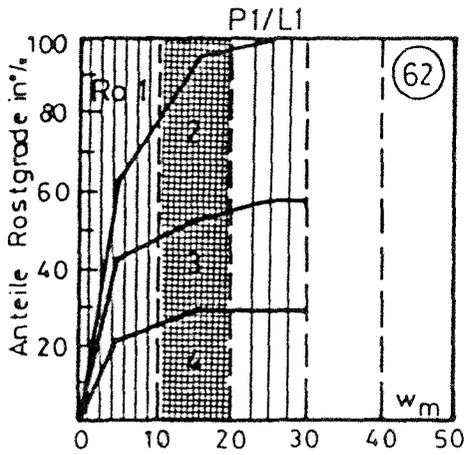
Tabelle 26: Häufigkeit der Korrosion an der Querbewehrung

Balken	Anzahl der Beobachtungsstellen an Rißstellen		korrodiert	ohne Korrosion
	Anzahl der Beobachtungsstellen im ungerissenen Bereich		korrodiert	ohne Korrosion
P1/L1	24 } 36 }	60	11 (46%) 1 (3%)	13 (54%) 35 (97%)
P1/N	30 } 30 }	60	24 (80%) 0 (0%)	6 (20%) 30 (100%)
P2/L1	3 } 57 }	60	2 (67%) 1 (2%)	1 (33%) 57 (98%)
P2/N	12 } 48 }	60	6 (50%) 0 (0%)	6 (50%) 48 (100%)
B1/L1	9 } 21 }	30	5 (56%) 8 (39%)	4 (44%) 13 (61%)
B1/L1M	15 } 15 }	30	11 (73%) 9 (60%)	4 (27%) 6 (40%)
B1/L2	0 } 30 }	30	- 6 (20%)	- 24 (80%)
B1/L3	9 } 21 }	30	0 (0%) 6 (29%)	9 (100%) 15 (71%)
B1/N	18 } 12 }	30	8 (44%) 1 (8%)	10 (56%) 11 (92%)
B2/L1	6 } 24 }	30	2 (33%) 10 (42%)	4 (67%) 14 (58%)

Tabelle 27: Anteil der korrodierten Staboberfläche und der Rostgrade bei der Bewehrung der Zwischenstücke

Versuchskörpertyp/ Betonart	Anteil der korrodierten Staboberfläche für die Rostgrade in (%)				Gesamtlänge der Längsrisse (cm)
	Ro1	Ro2	Ro3	Ro4	
P1/L1	0,4	0,9	0,6	0,1	68,5
P1/N	0,01	0	0	0	-
P2/L1	1,5	0,5	0	0,9	-
P2/N	0,05	0	0	0	-
B1/L1R ^{x)}	0,06	0,2	0,02	0	48,0
B1/L1M ^{x)}	0,7	0,9	0,6	0,1	13,0
B1/L2	0,4	0,2	0,7	0,4	-
B1/L3	0,2	0,3	-	-	-
B1/N	0,06	0,2	0,04	0,04	-
B2/L1	0,07	1,1	1,9	1,5	106,5

x) R = Auslagerungsort: Rheinhausen
 M = " : München
 (alle übrigen : Rheinhausen)

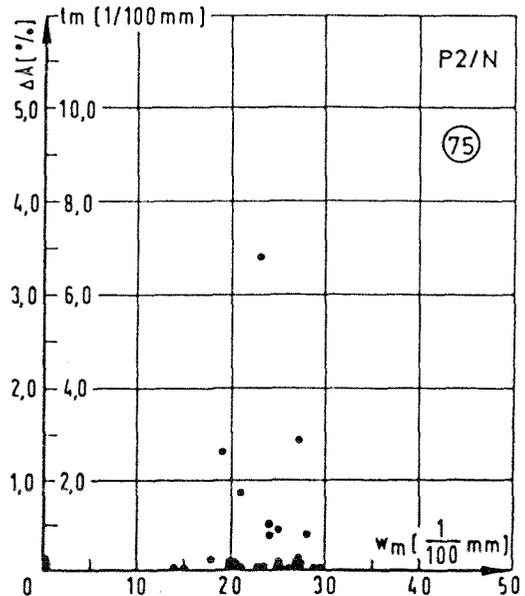
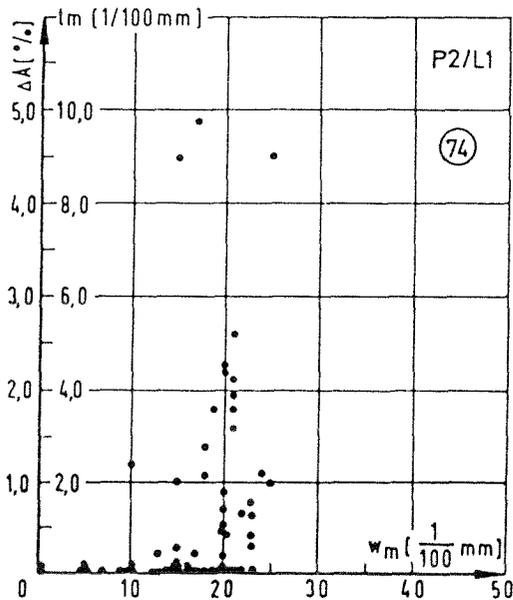
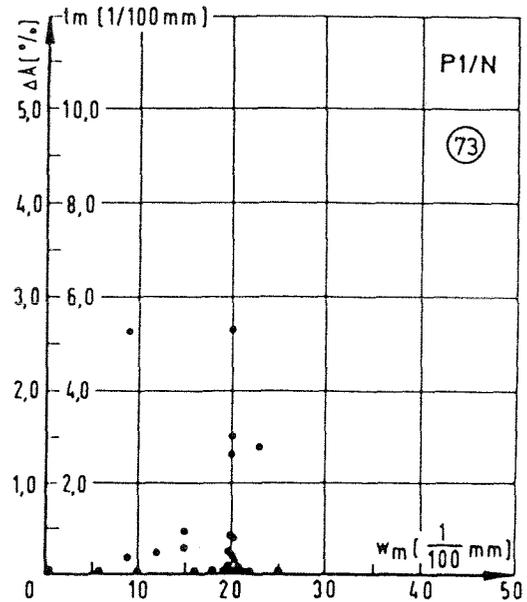
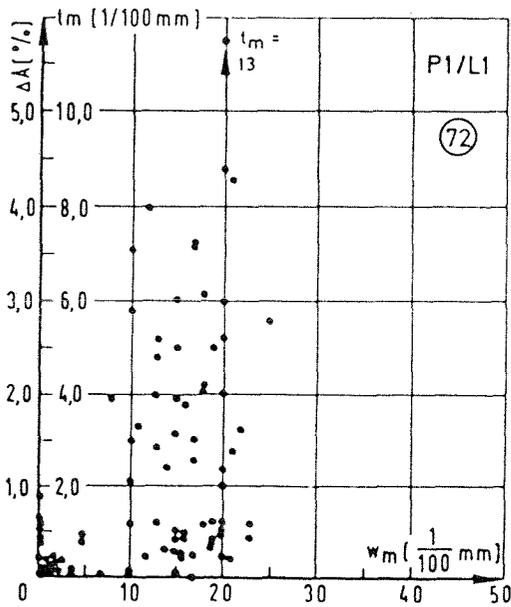


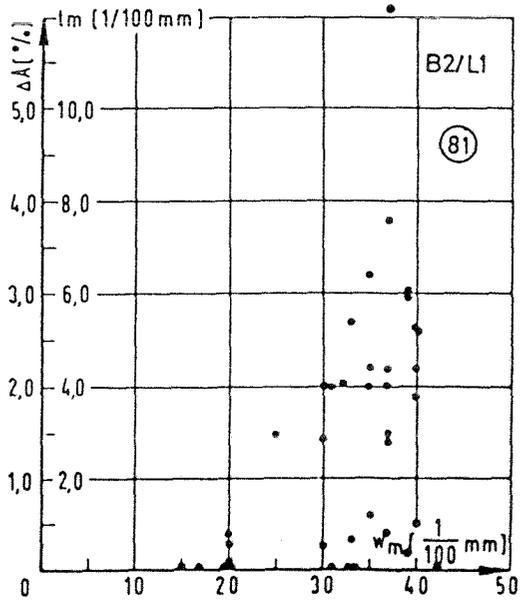
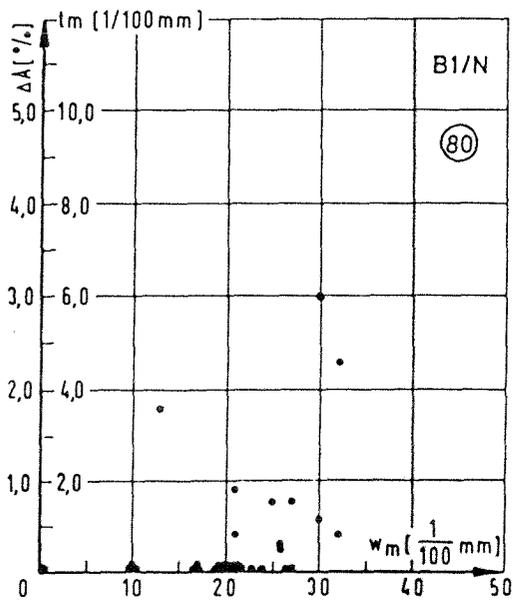
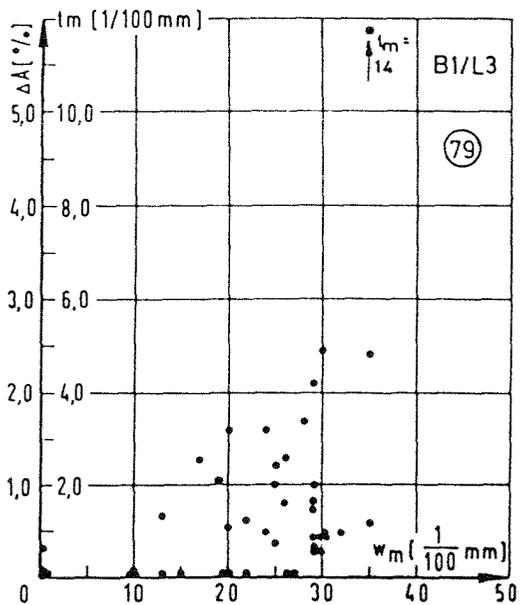
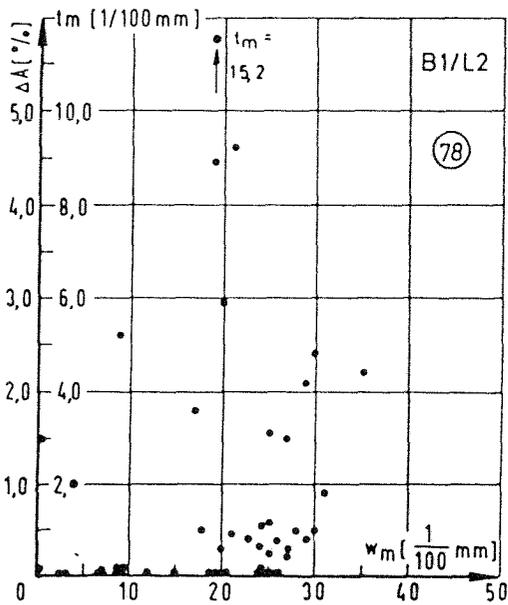
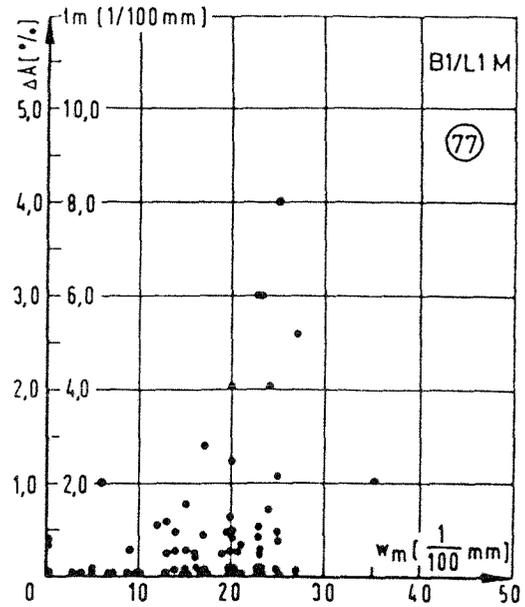
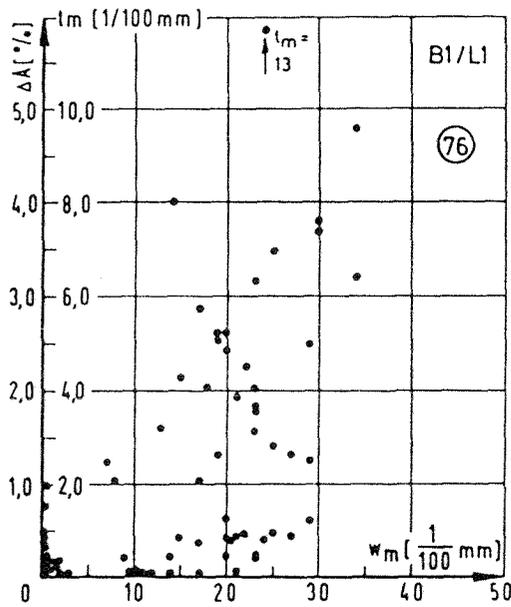
Bilder 62 - 71

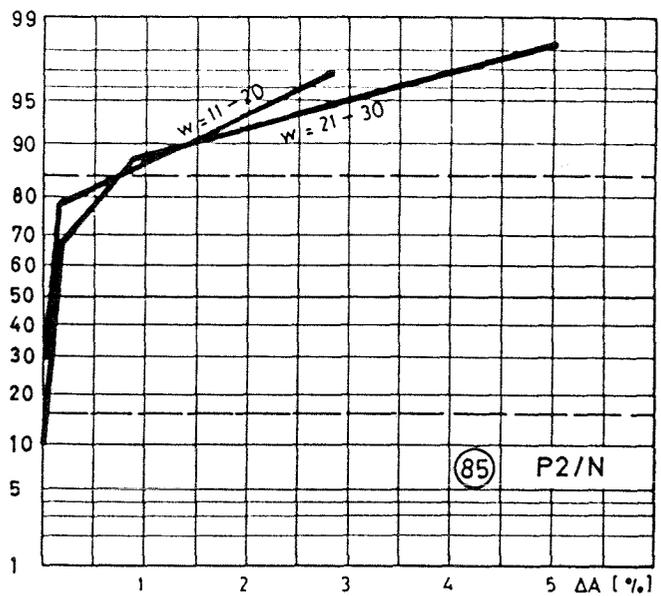
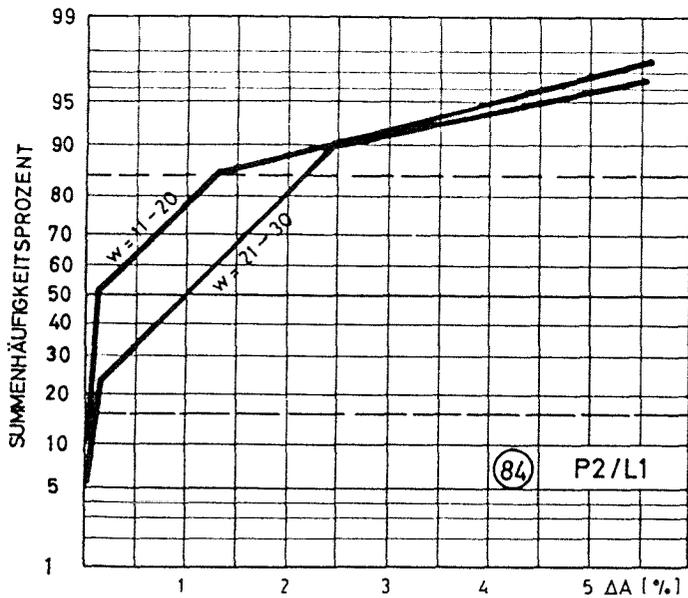
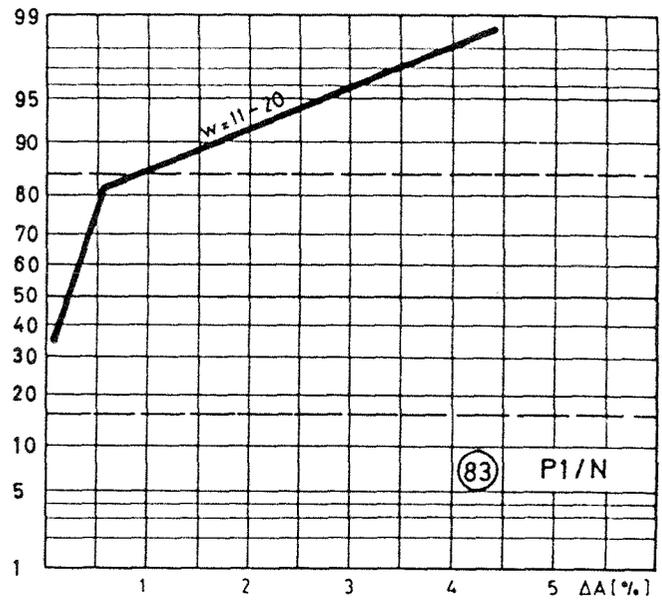
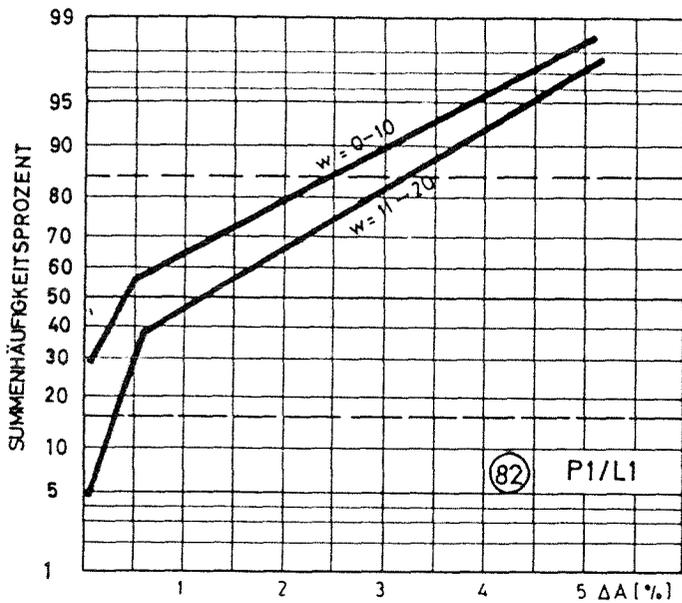
Rost an der
 Längsbewehrung
 stärkste beobachtete
 Rostgrade

Bilder 72 - 81: Rost an der Längsbewehrung

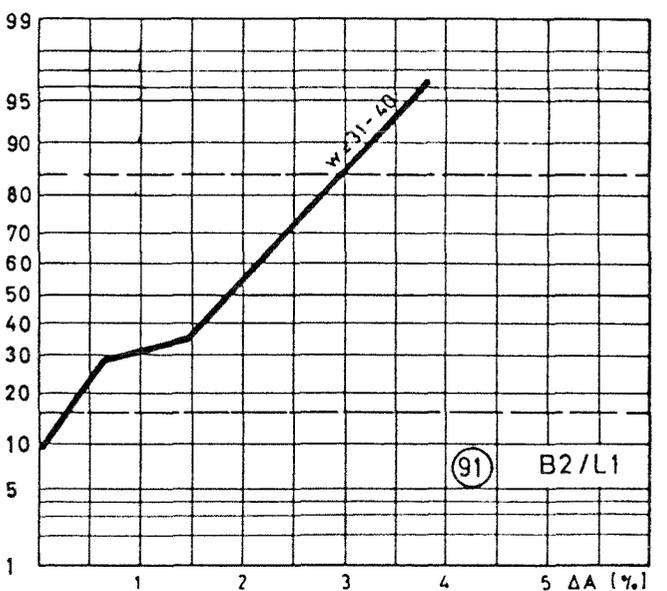
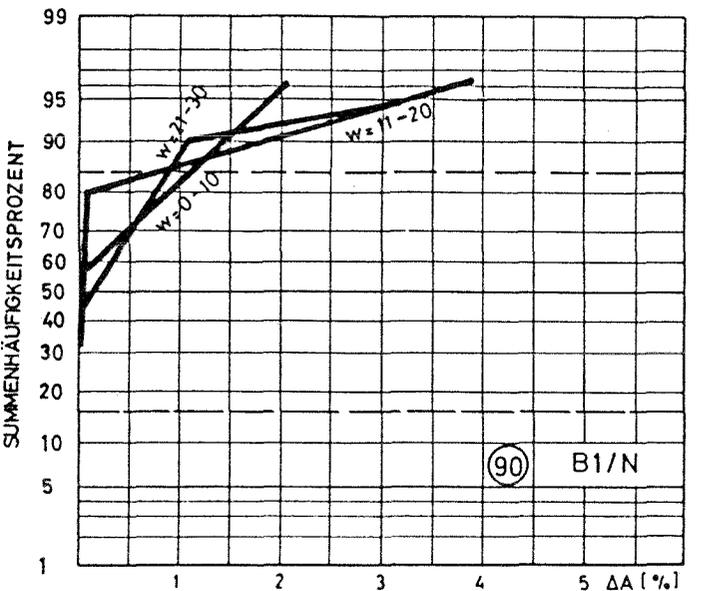
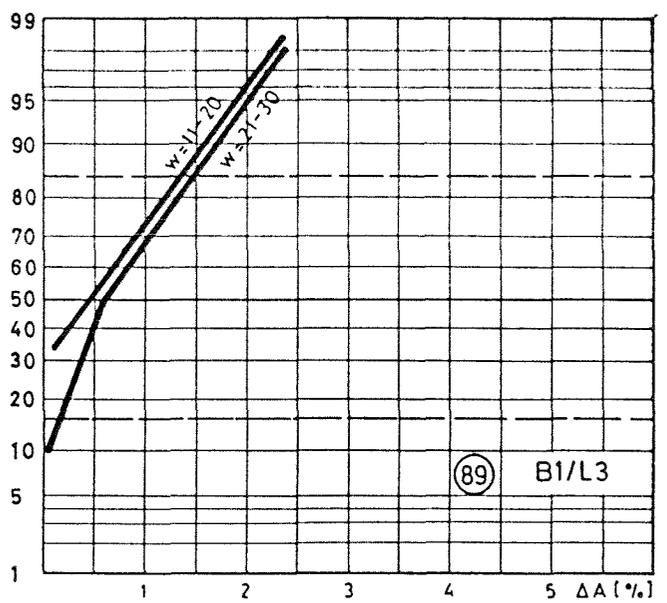
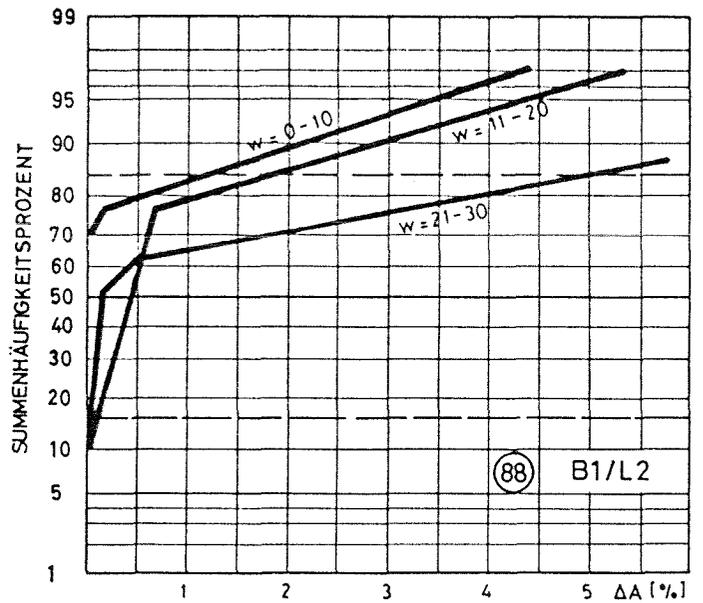
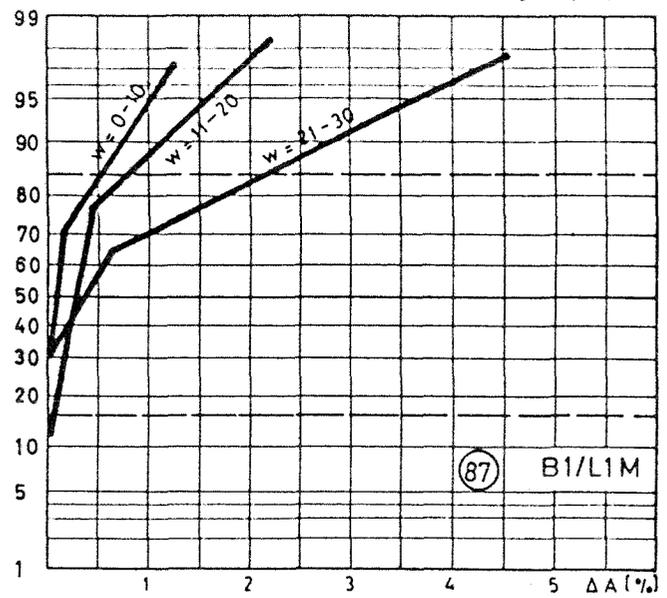
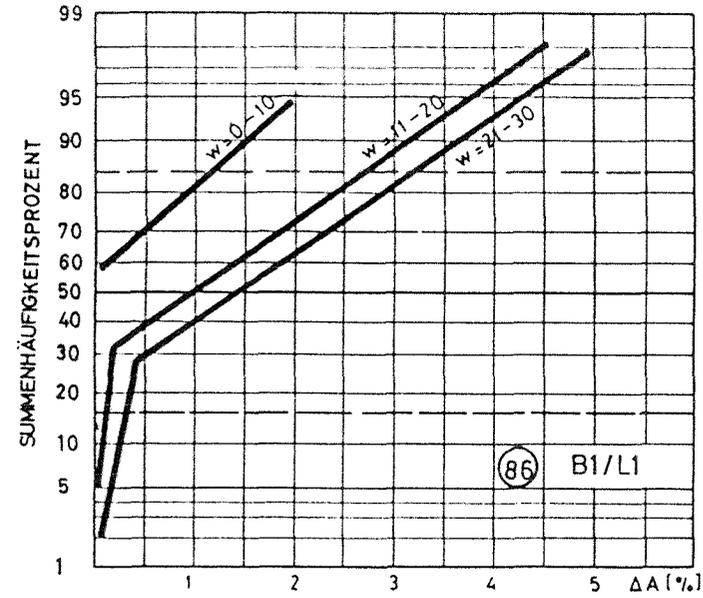
mittlere Abtragung t_m bzw. Querschnittsschwächung ΔA
in Abhängigkeit von der Ribbreite w_m

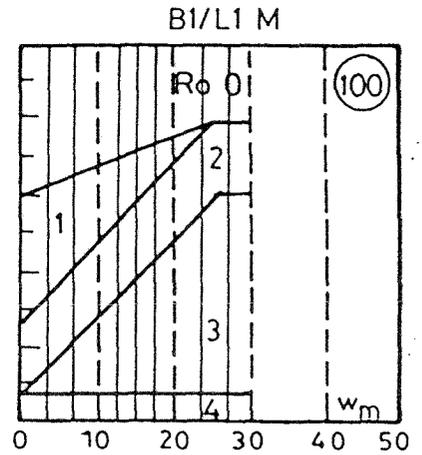
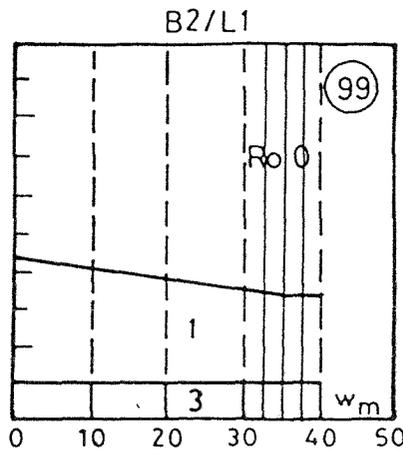
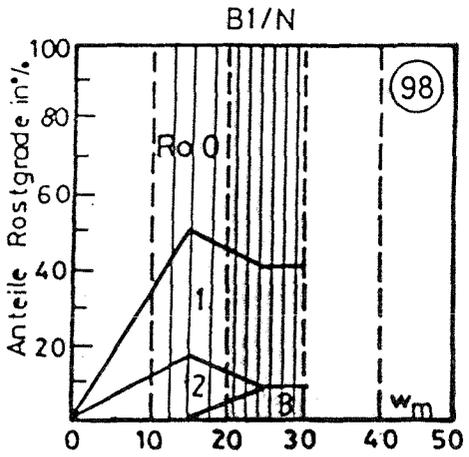
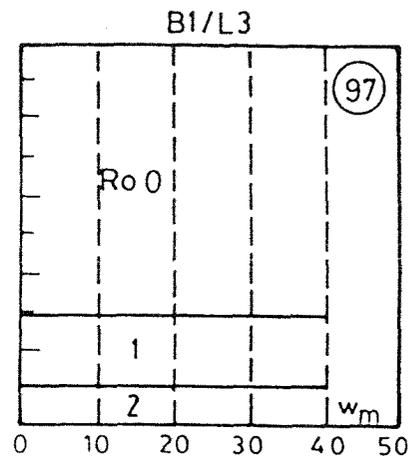
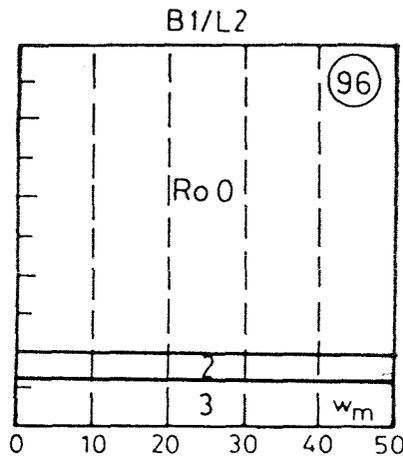
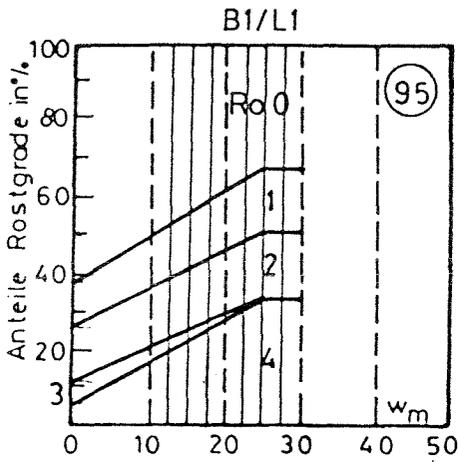
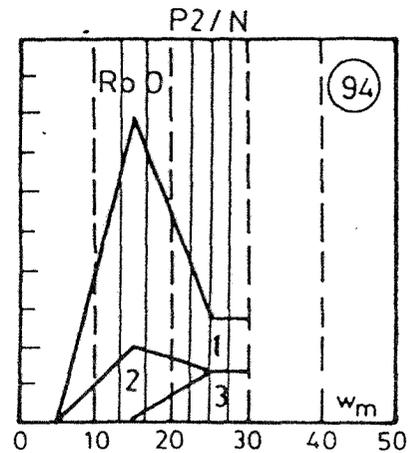
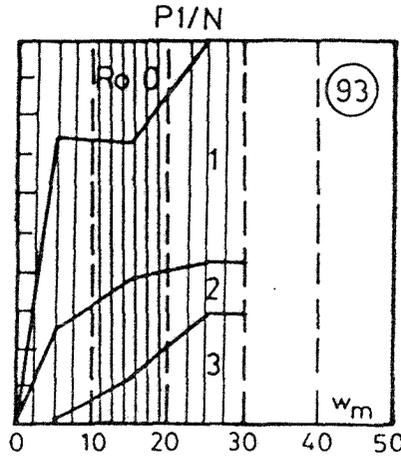
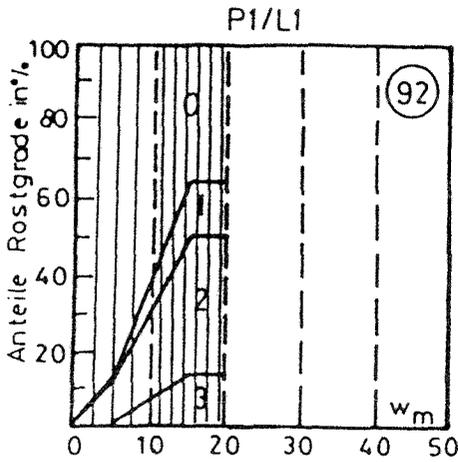




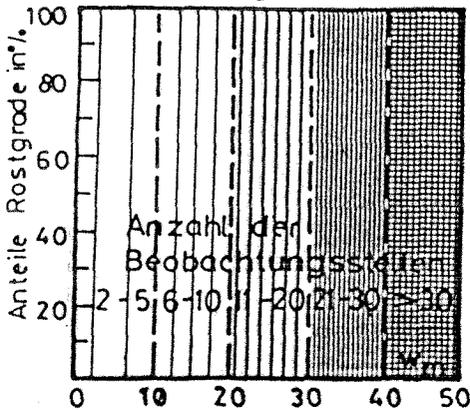


Bilder 82 - 91: Summenhäufigkeit der Querschnittsschwächung ΔA
 Rost an der Längsbewehrung
 Ribbreite w in 1/100 mm





Legende

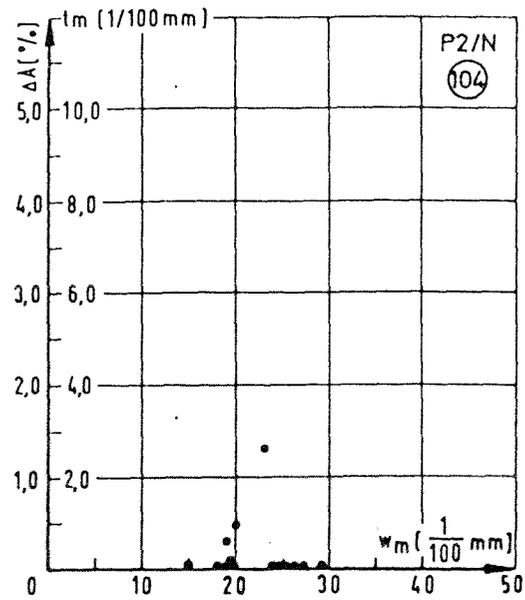
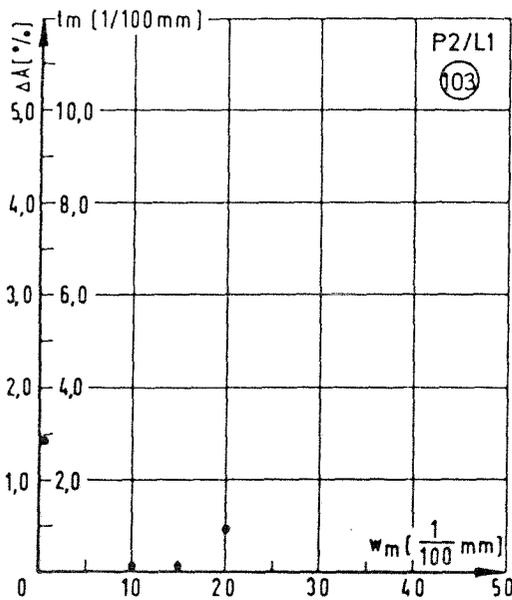
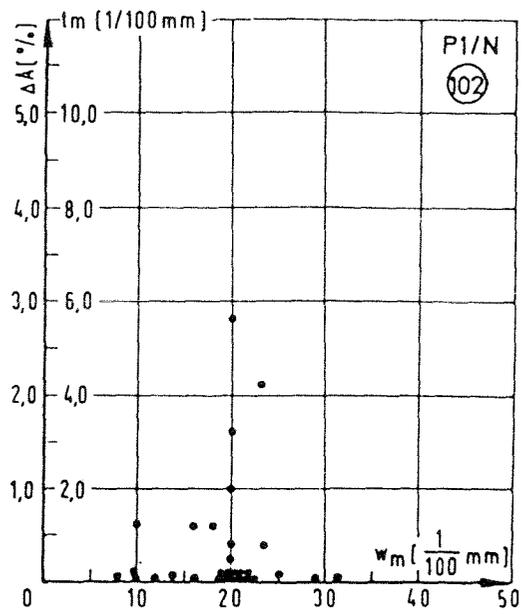
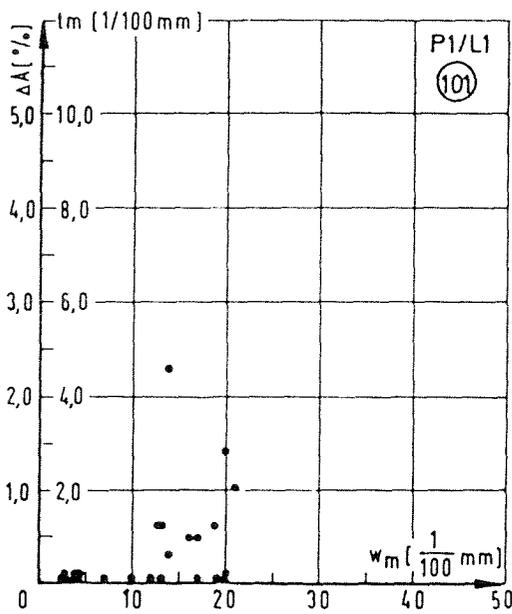


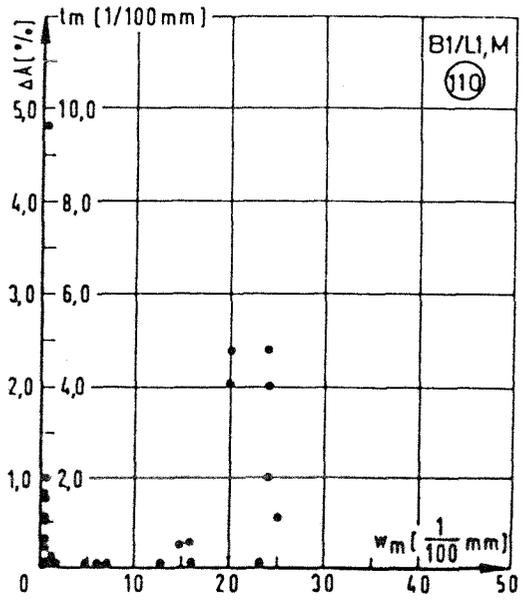
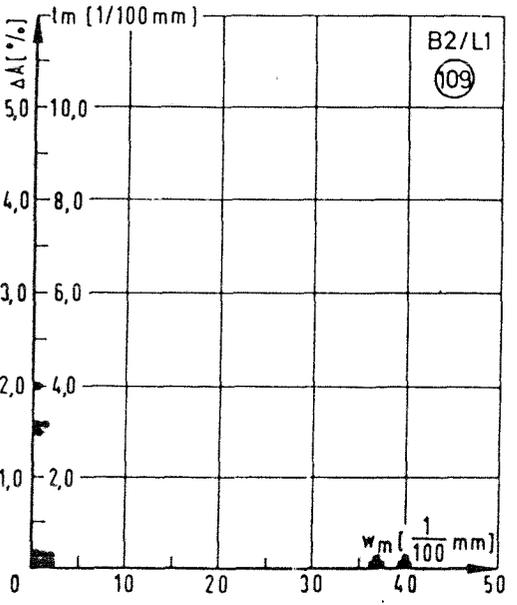
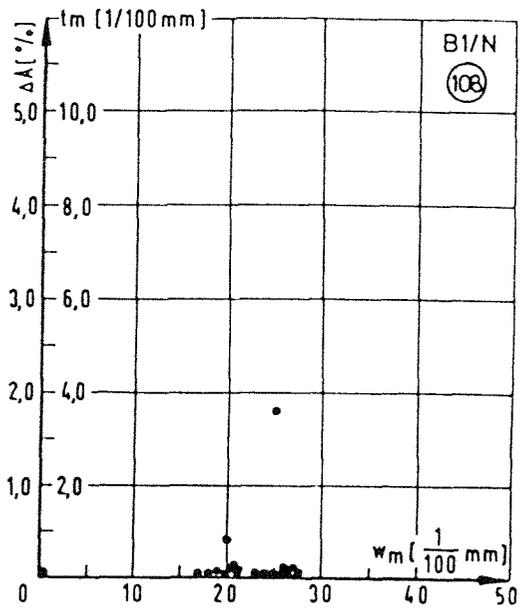
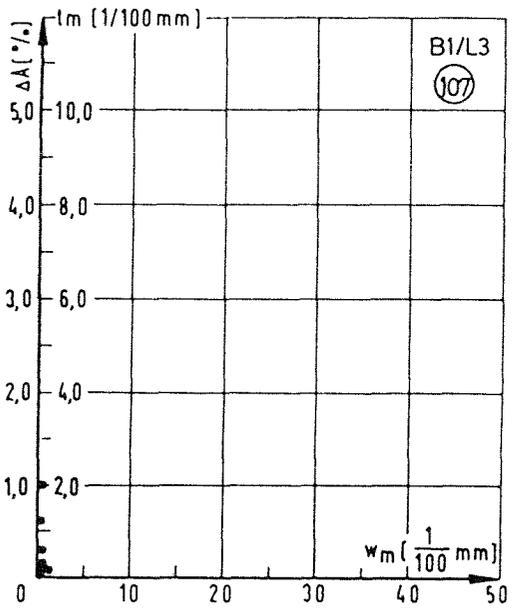
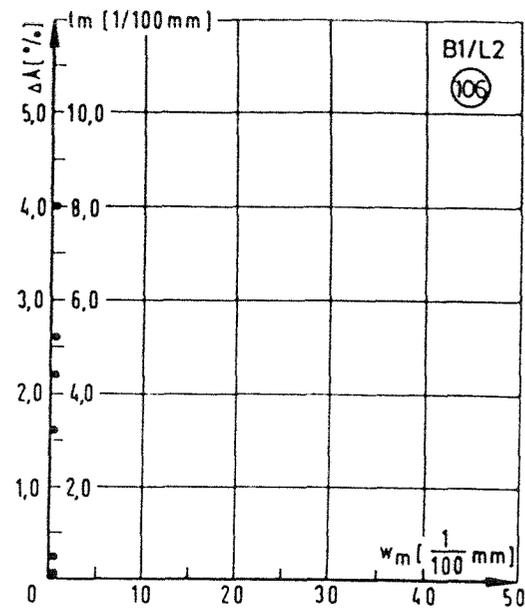
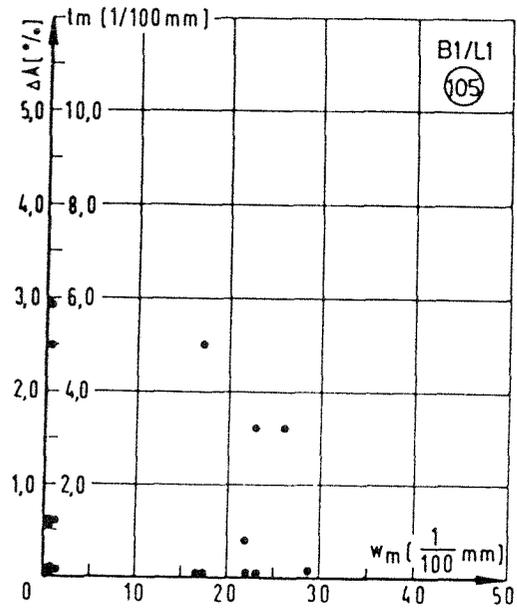
Bilder 92 - 100:

Rost an der Querbewehrung
 Stärkste beobachtete Rostgrade
 an den Beobachtungsstellen an Rissen
 und an Querstäben bzw. Bügeln, die
 nicht an Rissen gelegen waren.

Bilder 101 - 104: Rost an der Querbewehrung

Mittlere Abtragung t_m bzw. Querschnittsschwächung ΔA
 in Abhängigkeit von der Rißbreite w_m





Bilder 105 - 110: Rost an der Querbewehrung
 Mittlere Abtragung t_m bzw. Querschnittsschwächung ΔA
 in Abhängigkeit von der Ribbreite w_m

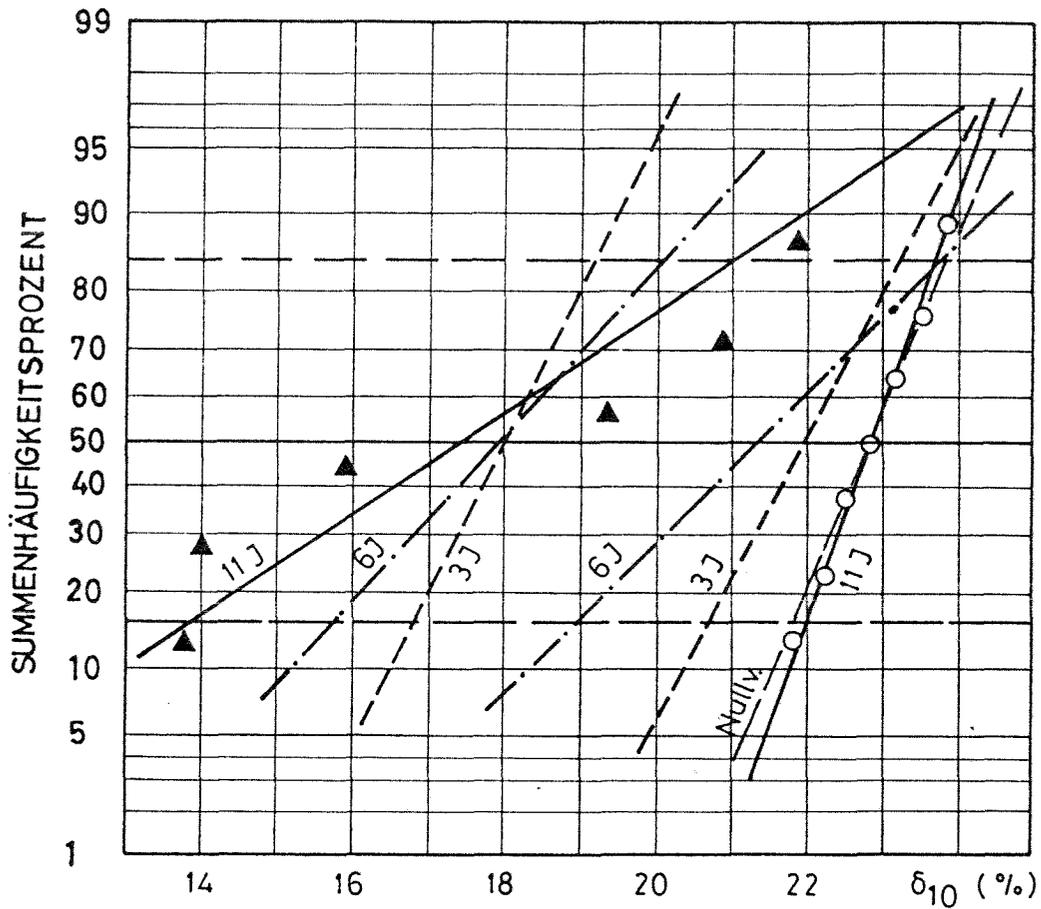
Tabelle 28: Ergebnisse der Zugversuche - Einzelwerte

Probe	Balken/Stahl	Narbentiefe an der Bruchstelle t_N ($^1/100$ mm)	R_S N/mm ²	R_Z N/mm ²	δ_{10} %
Ausgangsmaterial vor der Auslagerung (Nullversuche am 30.8.197)			518,2	736,9	23,0
			522,0	740,8	20,9
			511,0	734,4	21,5
Stäbe aus Zwischenstücken (ohne statische Beanspruchung)		30	478,6	702,4	21,9
		-	478,5	702,3	22,3
		-	482,0	701,8	23,9
rostfreie Stäbe	B1/N/7a	-	481,7	701,3	23,1
	B1/N/7a	-	482,6	698,8	22,5
	B1/L2/6a	-	485,9	698,0	22,9
	B1/L2/6b	-	481,9	701,6	23,5
korrodierte Stäbe aus Balken Ro2-Ro4	P1/L1/6a	50	470,2	683,9	13,8
	P1/L1/5b	70	476,0	684,9	14,0
	B1/L1/10b	40	479,6	703,9	15,9
	B1/L3/6a	10	494,1	698,6	19,4
	B1/N/8b	20	492,3	696,2	20,9

Tabelle 29: Ergebnisse der Zugversuche - Mittelwerte

	Anzahl der Proben		R N/mm ²	R_Z N/mm ²	δ_{10} N/mm ²
Ausgangsmaterial vor Auslagerung	3	\bar{x}	517,0	734,4	21,8
		s	5,6	3,2	1,1
		v	1,1%	0,44%	5,0
rostfreie Stäbe aus Zwischenstücken (ohne Beanspruchung)	2	\bar{x}	480,3	702,1	23,1
		s	-	-	-
rostfreie Stäbe	4	\bar{x}	483,0	699,3	23,0
		s	2,0	1,8	0,4
korrodierte Stäbe	5	\bar{x}	482,4	693,8	16,8
		s	10,4	13,8	3,2

Bild 111: Bruchdehnung δ_{10} der im Zugversuch geprüften Stähle BSt 420/500 RU
 ϕ 8 mm



- ▲ korrodierte Proben nach 11 Jahren
- nach 6 Jahren
- — — nach 3 Jahren

- rostfreie Proben nach 11 Jahren
- nach 6 Jahren
- — — nach 3 Jahren

- — — Nullversuche

Bild 112: Dauerschwingfestigkeit der Stähle nach sechsjähriger Auslagerung

$$\sigma_o/\sigma_u = 352/48 \text{ N/mm}^2 \quad 2\sigma_A = 304 \text{ N/mm}^2$$

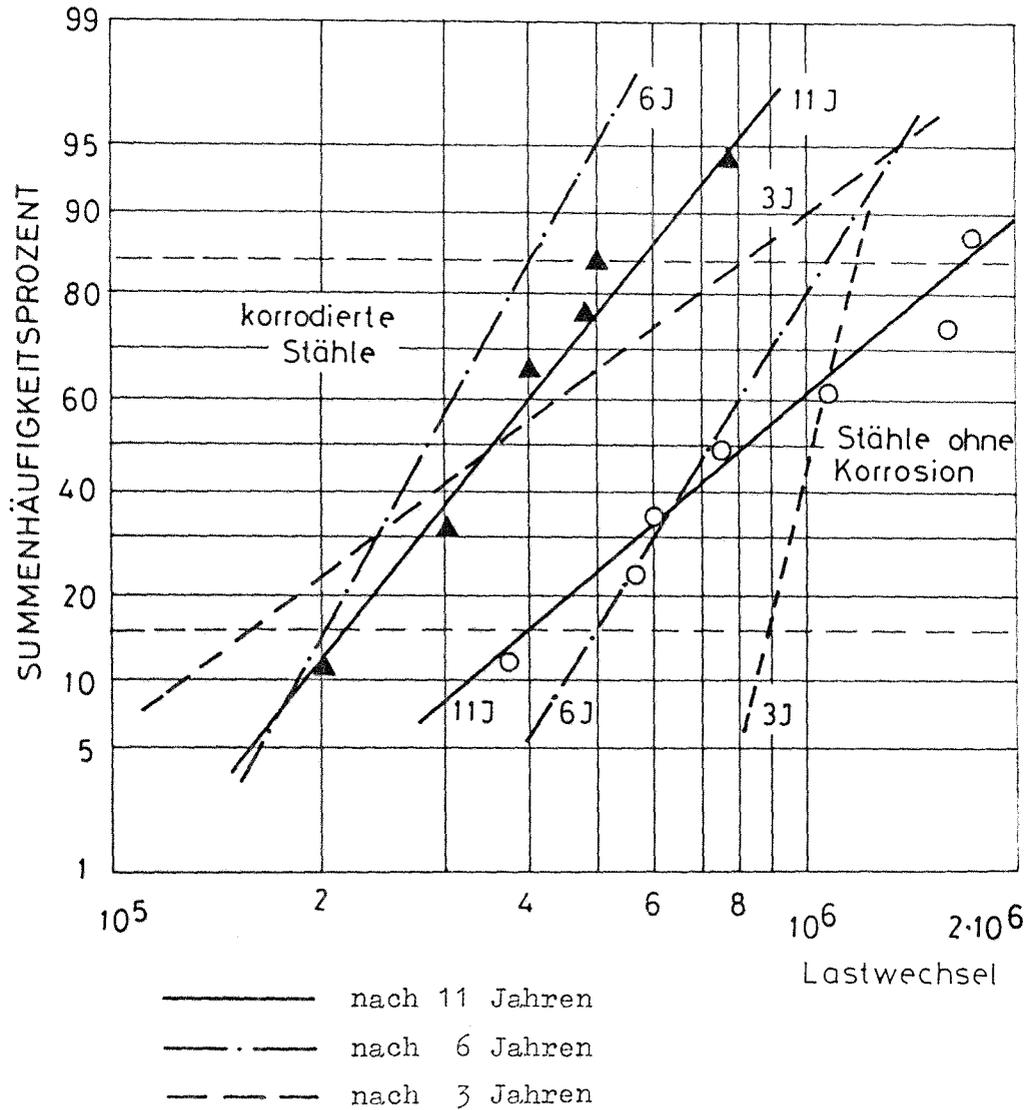


Bild 113: Einfluß der Querschnittsschwächung ΔA auf die Dauerschwingfestigkeit

$$\sigma_o/\sigma_u = 350/48 \text{ N/mm}^2 \quad 2\sigma_A = 304 \text{ N/mm}^2$$

