

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

# **Forschungsbericht 184**

**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln  
auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs  
„Umweltfreundlicheres Streusalz“)**

von Dr. Matthias Maultzsch, Dr. Wolfgang Stichel  
und Dr. Ernst-Joachim Vater

114 Seiten, 76 Abbildungen, 17 Tabellen

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon (030) 8104-1      Telex 183 261 bamb d  
Telefax (030) 811 20 29

Copyright \* 1992 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1  
Telefon (0471) 460 93-95



### **Vorwort**

In den Jahren 1980 – 1984 führte die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Auftrage des Umweltbundesamtes (UBA) Feldversuche und Laboruntersuchungen zur Einwirkung von Tausalzen auf Verkehrsbauwerke durch. Insbesondere war die Schadwirkung von herkömmlichem Tausalz (Natriumchlorid) mit der eines Mischsalzes aus Natrium- und Calciumchlorid zu vergleichen. Neben der BAM waren verschiedene andere Institutionen mit weiteren vergleichenden Untersuchungen zur Auswirkung auf die Vegetation, die Verkehrssicherheit und Werkstoffe des Fahrzeugbaus unter dem Projekttitel „Großversuch Umweltfreundlicheres Streusalz“ beauftragt worden.

Die Untersuchungsergebnisse der BAM wurden 1985 in einem Bericht zusammengefaßt. Das Gesamtprojekt wurde erst 1987 abgeschlossen, danach stand einer Veröffentlichung des vollständigen Berichts nichts mehr im Wege. Allerdings bestand zu diesem Zeitpunkt nur noch geringes Interesse an den Ergebnissen, da bereits 1981 der Senat von Berlin beschlossen hatte, auf Stadtstraßen grundsätzlich kein Streusalz mehr auszubringen. Dieser Beschluß hatte seinerzeit schon die Feldversuche des Forschungsprojektes eingeengt. In jüngster Zeit jedoch – gefördert auch durch die veränderte Situation in und um Berlin – kommen immer häufiger Diskussionen über die Verwendung calciumchloridhaltiger Auftausalze auf, und Nachfragen nach dem Forschungsbericht der BAM mehren sich. Obwohl Einzelergebnisse bereits früher für Beiträge in der Fachliteratur verwendet worden waren, sehen wir uns nunmehr veranlaßt, den gesamten Bericht in unveränderter Form zu veröffentlichen.

*M. Maultzsch*

### **Kurzfassung**

In Feldversuchen sollte vergleichend die Wirkung von Natriumchlorid und Mischsalz (80% NaCl + 20% Calciumchlorid) auf Beton, Stahlbeton und Asphaltstraßenbeläge untersucht werden. Hierzu wurden an Berliner Stadtstraßen Stahlbetonprobekörper ausgelagert bzw. Versuchsfelder angelegt und in drei Winterperioden dem stadtüblichen Winterdienst ausgesetzt. Parallel dazu wurden in systematischen Laborversuchen die Wirkungsparameter ermittelt. Der Calciumchloridanteil im Mischsalz bewirkte in insgesamt geringem Ausmaß partiell stärkere Veränderungen im Beton als vergleichbarer NaCl-Angriff. Unter natürlichen Bewitterungsbedingungen allerdings wirkten einige Vorteile des Mischsalzes anscheinend den Negativeinflüssen entgegen, so daß letztlich keine gravierenden Unterschiede zwischen den Salzarten festzustellen waren. Dasselbe gilt für die Korrosion von Betonstahl und die Einwirkung auf Fahrbahnbeläge. Eine Minderung der Schadwirkung durch den Einsatz von Mischsalz kann jedoch ausgeschlossen werden.

### **Abstract**

In a comparative study the effect of sodium chloride and mixed salt (80% sodium chloride and 20% calcium chloride) on concrete, reinforced concrete and on the asphaltic surface course of roads was to be investigated under outdoor conditions. For this purpose specimens of reinforced concrete were placed along main roads in Berlin and testing areas were installed. Both were exposed to the usual road-safety precautioning measures during three winter periods. At the same time the influence parameters were investigated by means of systematical laboratory tests. All in all, the proportion of calcium chloride in the mixed salt caused, to a smaller degree, partially greater changes in the concrete than a comparable sodium-chloride corrosion attack. However, under natural weather conditions some advantages of the mixed salt apparently counteracted the negative influences, consequently no decisive differences could ultimately be determined. The same applies to the corrosion of reinforced concrete and to the influence on surface courses of roads. A reduction of the damaging effect by employing mixed salt can, however, be excluded.

### **Schlagwörter**

Auftaumittel – Natriumchloridmischsalz – Betonkorrosion – Chloriddiffusion – Frosttauwechsel – Betonstahlkorrosion – Fahrbahnbeläge

### **Keywords**

deicing agents – sodium chloride – corrosion of concrete – chloride diffusion – frost-thawing-cycles – steel corrosion-wearing course of roads

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 Einleitung</b>	7
<b>2 Zielsetzung der Untersuchungen</b>	8
<b>3 Einwirkung der Tausalze auf Beton</b>	10
3.1 Dauerbeanspruchung bei Raumtemperatur	10
3.1.1 Lösungsaufnahme durch Kapillarkräfte	10
3.1.2 Diffusionsversuche	13
3.1.3 Einlagerungsversuche	18
3.2 Frost-Tau-Wechsel-Versuche	28
3.2.1 Befrostung von Betonwürfeln in den Salzlösungen	28
3.2.2 Frosttauwechsel bei einseitiger Tausalzbeanspruchung	35
3.3 Freibewitterung von Betonplatten	40
3.3.1 Versuchsdurchführung	40
3.3.2 Untersuchungsergebnisse	43
3.4 Feldversuche an Bordsteinen und Platten	53
3.4.1 Versuchsdurchführung	53
3.4.2 Untersuchungsergebnisse	57
3.5 Diskussion	62
<b>4 Untersuchungen zur Korrosion von Bewehrungsstahl</b>	65
4.1 Einfluß der Salzart	67
4.2 Elektrochemische Messungen	71
4.3 Zustand der Bewehrung	78
<b>5 Einwirkung auf bituminöse Fahrbahnbeläge</b>	80
5.1 Einleitung, Aufgabenstellung	80
5.2 Stand der Untersuchungen	81
5.3 Anlegen von Versuchsfeldern, Verkehrsbelastung	83
5.4 Abschätzung und Bewertung der möglichen Einflußfaktoren	87
5.4.1 Abschätzen der Einflußgrößen	87
5.4.2 Bewertung der Einflußfaktoren	90
5.5 Untersuchungen	90
5.5.1 Allgemeines	90
5.5.2 Verschleißmessungen auf der Straße	90
5.5.3 Festigkeitsuntersuchungen am Belag	91
5.6 Darstellung der Ergebnisse	92
5.6.1 Verschleißmessungen	92
5.6.2 Festigkeit des Belages	95
5.7 Interpretation der Versuchsergebnisse	96
5.8 Schlußfolgerungen und Zusammenfassung	100
<b>6 Zusammenfassung</b>	101
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	107



## 1 Einleitung

Die rasche Zunahme des Straßenverkehrs während der vergangenen Jahrzehnte brachte Bestrebungen mit sich, die durch winterliche Witterung bedingten Einschränkungen der Mobilität und Verkehrssicherheit möglichst weitgehend aufzuheben. Als geeignetes Mittel hierzu erschien neben der Schneeräumung und der zeitweilig zugelassenen Verwendung von Spikesreifen das Streuen von Auftausalzen auf die Fahrbahnen. In Deutschland wurden vor allem seit 1959 in stark steigendem Maße Streusalze eingesetzt, wobei im wesentlichen Steinsalz (Natriumchlorid) zur Anwendung kam. Dadurch verursachte Korrosionsschäden an Fahrzeugen und Betonfahrbahnen wurden lange Zeit zugunsten der Verkehrssicherung hingenommen. Das Ausmaß der Schädigung von Verkehrsbauwerken wurde vielfach unterschätzt. Erst die Erkenntnisse über irreversible Schäden am Straßenbegleitgrün und ein gesteigertes Umweltbewußtsein führten zu Überlegungen, die von den Streusalzen ausgehenden schädlichen Wirkungen zu vermindern. 1979 plante das Umweltbundesamt ein Forschungsprojekt, in dem die Wirkung eines als umweltfreundlicher eingestuften Mischsalzes in der Praxis erprobt werden sollte. Von dem aus 80 % Natriumchlorid und 20 % Calciumchlorid bestehenden Mischsalz war eine deutlich geringere biologische Belastung als von reinem Natriumchlorid zu erwarten. Im Herbst 1979 wurde die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in die Planung einbezogen, um vergleichende Untersuchungen zur Wirkung des "umweltfreundlicheren" Mischsalzes und des üblichen Streusalzes insbesondere auf Verkehrsbauwerke vorzubereiten. Der im Juli 1980 vom Umweltbundesamt erteilte Forschungsauftrag war in sechs Teilvorhaben gegliedert. Die Teilprojekte zur "Einwirkung der Tausalze auf Beton" wurden von M. Maultzsch, das Teilvorhaben "Untersuchungen zur Korrosion von Bewehrungsstahl" von W. Stichel und das zur "Wirkung auf bituminöse Fahrbahnbeläge" von E. J. Vater bearbeitet und im Abschlußbericht getrennt dargestellt.

Die schädigende Wirkung von Auftausalzen auf Beton ist seit langem bekannt und hat bereits in den 30er Jahren zu umfangreichen Untersuchungen geführt (1, 2). Trotz zahlreicher weiterer Arbeiten auf diesem Gebiet konnten bisher nur Teilaspekte der Schadensmechanismen geklärt und verständlich gemacht werden (u. a. (3)). Die Beurteilung der Salzart aufgrund der Versuchsergebnisse ist widersprüchlich geblieben. Während ein Teil der Autoren das Calciumchlorid für stärker angreifend als NaCl hält (1, 4) und Erklärungen für die größere Schädlichkeit des  $\text{CaCl}_2$  findet (5, 6), kommen andere Autoren zu der gegenteiligen Auffassung (7). Letztere stufen das Mischsalz als gleichartig angreifend wie reines Natriumchlorid ein. Der Mangel an präzisen Aussagen zur Schadwirkung des calciumchloridhaltigen Mischsalzes vor dem Hintergrund zunehmenden volkswirtschaftlichen Schadens an den Verkehrsbauwerken, insbesondere Stahl- und Spannbetonbrücken, der von Tausalzen verursacht wird (8, 9, 10), machte entsprechende praxisgerechte Untersuchungen erforderlich. Das vorrangige Ziel war der Vergleich der Einwirkung von Mischsalz und Natriumchlorid auf Beton und Stahlbeton bzw. die Stahlbewehrung bei jeweils gleichartiger Beanspruchung. Vorteile des Mischsalzes durch eine geringere Einsatzmenge, die nach Erfahrungen der Praxis gegebenenfalls möglich gewesen wäre (11), sollten nicht berücksichtigt werden. Da über die Beständigkeit von bituminösen Fahrbahnbelägen gegenüber Auftaumitteln wenig bekannt war, wurde das Versuchsprogramm um ein entsprechendes Teilprojekt erweitert.

Nach dem Stand der Diskussionen auf sachlicher (12) und politischer Ebene (13) war im Jahre 1980 davon auszugehen, daß bei zwar mengenmäßiger Einschränkung weiterhin auf den Berliner Hauptverkehrsstraßen wie auch auf der Stadtautobahn Tausalz zur Glättebekämpfung eingesetzt würde. Da aus verkehrstechnischen und -rechtlichen Gründen Versuchsfelder auf der Stadtautobahn nicht anzulegen waren, wurden Abschnitte von Stadtstraßen zur Auslagerung von Betonprobekörpern bzw. für die Untersuchung von Fahrbahnbelägen ausgewählt. Dabei wurde möglichst eine räumliche Verknüp-

fung mit den Versuchspflanzungen der Biologischen Bundesanstalt, die im Rahmen desselben Großversuchs erfolgt waren (14), angestrebt. Unter Bedingungen der Praxis, d. h. während der Beanspruchung durch den üblichen Winterdienst und klimatische Einwirkungen, sollten Korrosionserscheinungen an Betonen unterschiedlicher Qualität und an der Bewehrung sowie die Chloridaufnahme der Betone, ferner der Angriff auf bituminöse Fahrbahnbeläge verfolgt werden. Da diese Vorgänge nur sehr langsam ablaufen, war ein Beobachtungszeitraum von mindestens 3 Jahren erforderlich.

Parallel zu den Feldversuchen, die in Abschnitt 3.4 und 5 eingehend dargestellt werden, waren vorsorglich Laborversuche zur Klärung grundsätzlicher Fragen sowie Freilandversuche auf dem BAM-Gelände geplant worden. Diese erhielten durch die politische Entscheidung im Jahre 1981, auf den Einsatz von Streusalz auf Stadtstraßen in Berlin weitgehend zu verzichten, erheblich stärkeres Gewicht als ursprünglich vorgesehen; sie werden im folgenden ausführlich behandelt. Dabei sollten unabhängig von den nicht beeinflussbaren und oft nur unzureichend zu erfassenden Parametern der Feldversuche Vorgänge bei ständiger Einwirkung der Tausalzlösungen auf Betone sowohl bei Raumtemperatur als auch bei Frosttauwechseln sowie bei definierter Salzstreuung im Freilandversuch beobachtet werden. Weiterhin waren gezielte Korrosionsuntersuchungen an Baustahl durchzuführen. Ebenso enthielt das Versuchsprogramm Laboruntersuchungen an Straßenbelag-Probekörpern. Die ursprüngliche Zielsetzung, vorwiegend in Feldversuchen präzise, praxisgerechte Aussagen zur Tausalzschädigung zu gewinnen, mußte dagegen wegen der eingeschränkten Salzbelastung im 2. und 3. Winter des Versuchszeitraumes zurückstehen. In allen Versuchsreihen aber blieb der Vergleich der Wirkungen von Mischsalz und Natriumchlorid das angestrebte Ziel.

### 3 Einfluß der Tausalze auf Beton

#### 3.1 Dauerbeanspruchung bei Raumtemperatur

##### 3.1.1 Lösungsaufnahme durch Kapillarkräfte

Beton ist ein porenhaltiger Baustoff, dessen offene Poren zu einem großen Teil als Kapillaren ausgebildet sind. Daher ist es beim Eintauchen in Salzlösungen möglich, daß diese infolge der Kapillarkräfte im Beton aufsteigen. Wegen der dabei maßgeblichen Grenzflächenspannungen und der Viskosität wird das kapillare Saugvermögen von der Konzentration und der Art des Salzes in der Lösung beeinflusst.

Zur Untersuchung dieser Einflüsse fanden Zementmörtelprismen nach DIN 1164 Verwendung, die nach 4wöchiger Erhärtung unter Wasser teils bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet wurden, teils im Normalklima 23/50 mehrere Monate bis zum jeweiligen Prüftermin lagerten. Die Proben gaben bei vollständiger Trocknung  $(47,4 \pm 3,6)$ g Wasser ab. Bezogen auf die durch Tauchwägung zuvor ermittelten Volumina errechnete sich das mittlere Porenvolumen zu  $(18,4 \pm 1,2)\%$ . Die luftgelagerten Prismen gaben  $(29,6 \pm 0,8)$ g Wasser ab; da die jeweils vor Versuchsbeginn ermittelten Einzelwerte keine Zeitabhängigkeit aufwiesen, kann man annehmen, daß sich bei allen Proben eine Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hatte. Bezogen auf die Wasserabgabe der getrockneten Proben betrug diese knapp 40 %, d. h. etwa 60 % des offenen Porenraumes standen für das Aufsaugen der Lösungen zur Verfügung.

Die Prismen wurden waagrecht an einer elektronischen Waage hängend mit einer Seitenfläche in die Salzlösungen so eingetaucht, daß zu Versuchsbeginn die einander entgegengesetzt wirkenden Kräfte von Auftrieb und Oberflächenspannung ausgeglichen waren. Die Höhe des Flüssigkeitsspiegels wurde während der Messung konstant gehalten. Die zunehmende Masse der Prismen registrierte ein Drucker zu bestimmten Zeitpunkten, deren Abstände in der Wurzel-Zeit-Funktion gleich waren, d. h. die Werte wurden 25, 100, 225, 400, 625 ... s nach dem Eintauchen aufgenommen. Die



maximale Meßzeit betrug 81 h = 291.600 s ( $\sqrt{t} = 540 \text{ s}^{0,5}$ ).  
In Bild 1 sind als Beispiel die Meßpunkte für zwei

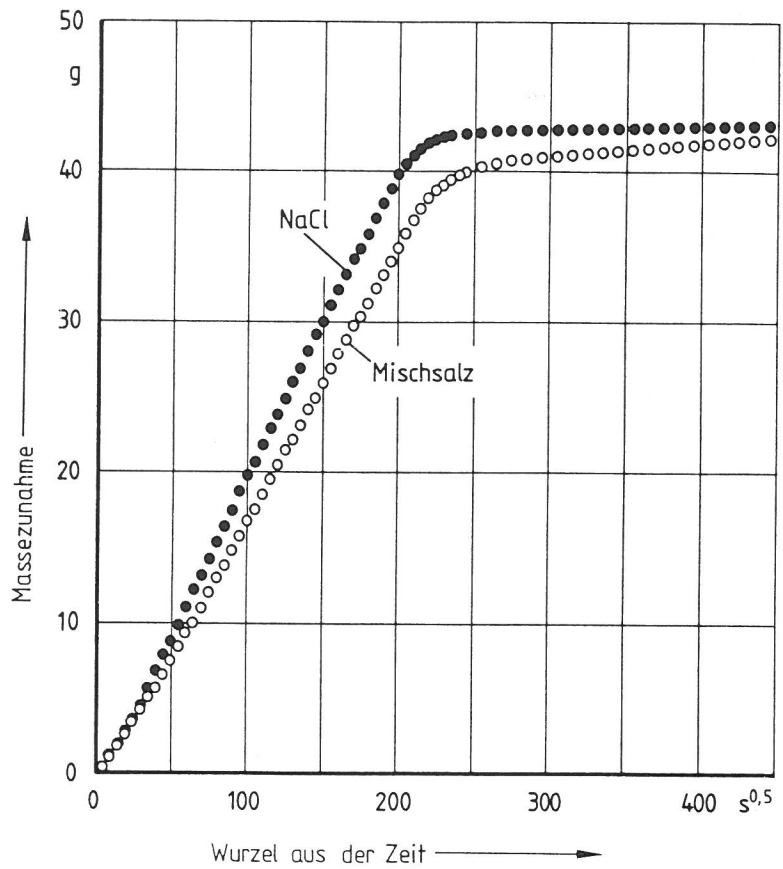


Bild 1  
Kapillare Lösungsaufnahme von ge-  
trockneten Mörtelprismen  
4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>

getrocknete Prismen aufgetragen, die einer NaCl- bzw. Mischsalz-Lösung von 4 % ausgesetzt worden waren. Die zeitabhängige Wasseraufnahme durch kapillares Saugen  $W_A$  läßt sich nach KÜNZEL (15) mit der Formel  $W_A = A \cdot \sqrt{t}$  beschreiben, wobei  $t$  die Zeit in Sekunden und  $A$  der Wasseraufnahmekoeffizient in  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  ist. Für Salzlösungen, deren Dichte mit der Konzentration deutlich zunimmt, sollte die aufgenommene Menge nicht gewichtsmäßig, sondern als Volumen betrachtet werden, um vergleichbare Werte zu erhalten. Aus  $A$  wird dann durch Division mit der Lösungsdichte der Flüssigkeitsaufnahmekoeffizient  $A'$  in  $\text{dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ . Wie Bild 1 erkennen läßt, folgt der Saugvorgang nach einem kurzen abweichenden Anfangseffekt der genannten Formel, d. h. die aufgenommene Flüssigkeitsmenge ist der Wurzel aus der Zeit linear proportional, bis die Durchfeuchtung die Oberseite des Prismas erreicht hat. Im weiteren Verlauf steigt die Lösungsaufnahme nur noch geringfügig infolge des allmählichen Füllens der zuvor noch nicht erfaßten feinsten Kapillarporen. Maßgeblich für das

Verhalten der porösen Baustoffe in der Praxis ist der erste steile Anstieg, aus dessen Steigung der die Sauggeschwindigkeit kennzeichnende Koeffizient  $A'$  zu berechnen ist. In Bild 2 sind die Mittelwerte für  $A'$ , die aus jeweils 2-3 Einzelwerten gewonnen worden sind, über der Konzentration der Lösungen beider Salzarten aufgetragen. Trotz der großen Streuung, die schon durch kleine Unterschiede im Porengefüge verursacht werden können, ist die auch theoretisch erwartete Abnahme des kapillaren Saugvermögens mit zunehmender Konzentration eindeutig. Für NaCl-Lösungen allerdings sind im Bereich niedriger Konzentration erheblich höhere Werte als für Wasser zu finden. Die Aufnahme von Mischsalzlösungen ist allgemein deutlich niedriger als die von NaCl-Lösungen.

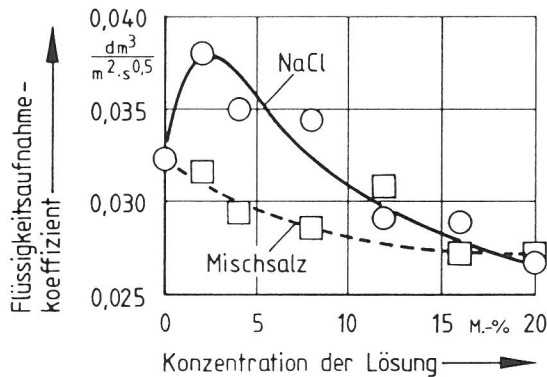


Bild 2  
Flüssigkeitsaufnahmekoeffizient getrockneter Zementmörtel in Abhängigkeit von der Lösungskonzentration

Proben, deren Porenraum partiell noch Feuchtigkeit enthält, nehmen sehr viel langsamer Lösungen durch kapillares Saugen auf. Die entsprechenden Kurven folgen nicht der angegebenen Formel und lassen sich nicht in mathematisch einfacher Form beschreiben. In Bild 3 sind die als Mittelwerte aus je drei Einzelwerten zusammengefaßten Ergebnisse mit Wasser, 2- und 4-prozentigen NaCl- bzw. Mischsalz-Lösungen dargestellt. Hier scheint der negative Einfluß von NaCl sich auf die 2-prozentige Lösung zu beschränken und insgesamt geringer zu sein, während die 4-prozentige bereits zu sehr viel langsamerer Flüssigkeitsaufnahme führt. Noch niedriger ist die von Mischsalzlösung, bei der sich kein Unterschied zwischen den Konzentrationen 2 % und 4 % finden ließ.

Die verhältnismäßig rasche Durchfeuchtung der Prismen infolge der Kapillarkräfte bedingt nicht gleichzeitige Chlo-

ridaufnahme. Dieses wurde an einer Probe nach Versuchsabschluß mittels des unter 3.1.2 beschriebenen Sprühtests überprüft. Die  $\text{Cl}^-$ -Eindringtiefe betrug nur ca. 6 mm (s. a. Ausführungen zur Masseänderung der Betonzylinder unter 3.1.2).

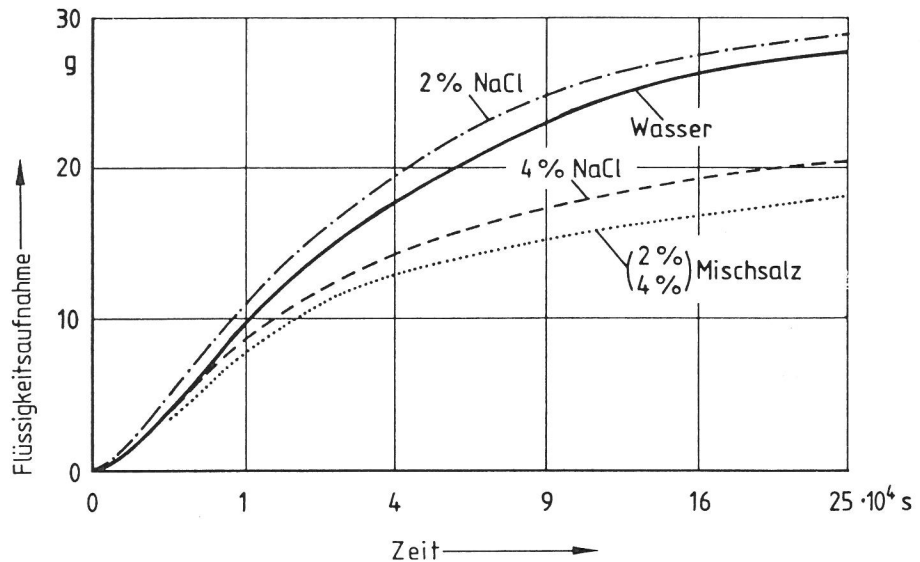


Bild 3  
Kapillare Flüssigkeitsaufnahme von lufttrockenen Mörtelprismen in Abhängigkeit von der Wurzel aus der Zeit

### 3.1.2 Diffusionsversuche

An Betonprobekörpern mit aufstehender Salzlösung sollte geklärt werden, ob unterschiedliche Chloriddiffusion durch NaCl und Mischsalz bewirkt wird. Dazu wurden Zylinder von 65 mm Durchmesser und 100 mm Höhe aus einem Beton hergestellt, dessen Kennwerte in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Sieblinie des Zuschlags	B <sub>8</sub>
Zuschlag-Anteil im Beton (kg/m <sup>3</sup> )	1720
Zementart	PZ 35 F
Zementgehalt im Beton (kg/m <sup>3</sup> )	332
w/z	0,60
Konsistenz (Ausbreitmaß) (cm)	42
Rohdichte Frischbeton (kg/dm <sup>3</sup> )	2,25
Rohdichte Festbeton (kg/dm <sup>3</sup> )	2,21
Druckfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	30,8

Tabelle 1  
Kennwerte des Betons für Zylinderversuche

Die Zylinder erhärteten nach dem Entformen 4 Wochen unter Wasser. Während eine Probenserie weitere 5 Wochen im Wasser verblieb, lagerte die andere Serie über den gleichen Zeitraum im Normalklima 23/50. Anschließend erhielten die Zylinder eine Epoxidharzummantelung, wobei die Stirnflächen frei blieben und nachträglich abgeschliffen wurden, sowie einen Aufsatzring, der mit Silikonkautschuk abgedichtet wurde.

Eine nachträglich hergestellte kleinere Probenserie, für die der gleiche Zement, jedoch aus einer anderen Charge, verwendet worden war, wies nahezu übereinstimmende Frischbeton- und Festbeton-Kennwerte auf mit Ausnahme des Ausbreitmaßes, das hier nur 36 cm betrug. Im übrigen wurden die Proben in der gleichen Weise behandelt wie die der Hauptserie.

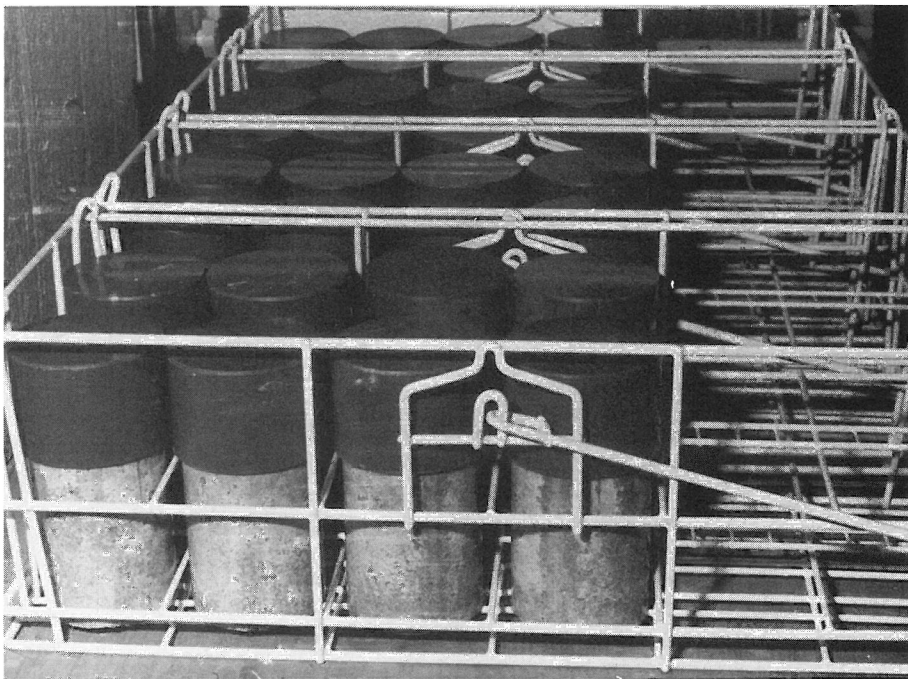


Bild 4  
Betonzylinder mit Aufsatzringen für  
die Diffusionsversuche

Die Aufsatzringe wurden bis zu einer Höhe von 4 cm mit vierprozentiger Natriumchlorid- bzw. Mischsalzlösung gefüllt und mit einer Kunststoffscheibe abgedeckt, um Verdunstung zu verhindern. Die untere Stirnfläche der Zylinder blieb frei. Bild 4 zeigt einen Teil der in speziellen Körben im Klimaraum bei 21...22 °C und 50...55 % r. F. aufgestellten Proben. In Abständen von 2 Wochen, später 3 Wochen, wurden die Lösungen abgegossen und durch frische

ersetzt. Dabei erfolgten auch Wägungen der Zylinder. Die Einwirkungsdauer der Salze lag bei 16, 30, 100, 256, 400 und 570 Tagen. Die Zeiten für die Nachserie betrugen 64 und 169 Tage. Zum Prüftermin wurden 2 Proben je Vorlageungsart und Salzlösung entnommen, nach Entfernen des Aufsatzringes in Längsrichtung gespalten und dem sogenannten Sprühtest unterzogen. Hier wirken nacheinander Silbernitrat- und Kaliumdichromatlösungen auf die Bruchfläche der Betone ein. Danach färbt sich die besprühte Fläche im Bereich merklicher Chloridgehalte gelb, im Bereich sehr niedriger Chloridgehalte rot. Der Abstand der Farbgrenze von der Beanspruchungsfläche wird als Chlorideindringtiefe gewertet. Die Berechtigung dieser Annahme konnte durch zusätzliche chemische Analysen von in Scheiben zerlegten Zylindern bestätigt werden.

In Bild 5 und 6 sind die Eindringtiefen als Mittelwert aus den an jeweils 4 Zylinderhälften gefundenen Einzelwerten über der Wurzel aus der Zeit aufgetragen. Die lineare Korrelation in dieser Darstellung zeigt, mit Ausnahme eines Anfangseffektes, einen einfachen Diffusionsprozeß

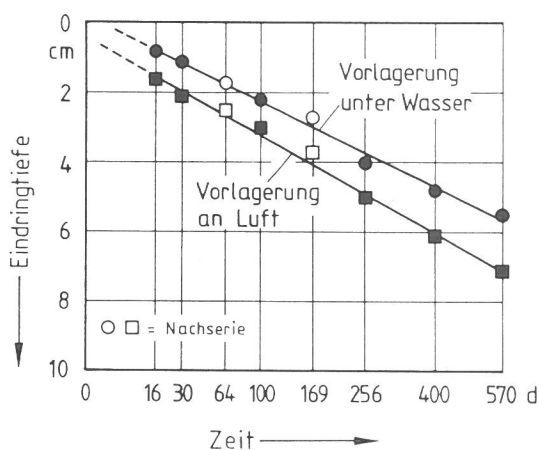


Bild 5  
Chlorideindringtiefe in Beton bei aufstehender NaCl-Lösung (4%);  $\sqrt{t}$  - Maßstab

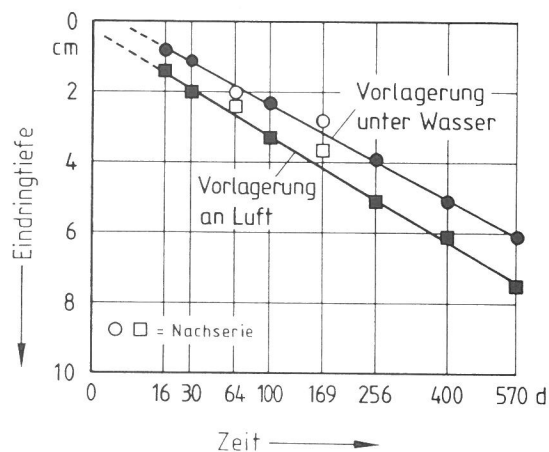


Bild 6  
Chlorideindringtiefe in Beton bei aufstehender Mischsalzlösung (4%);  $\sqrt{t}$  - Maßstab

an, d. h. die Eindringtiefe ist direkt der Wurzel aus der Zeit proportional und der Diffusionskoeffizient konstant. Dieser kann aus der Steigung der Geraden errechnet werden (Tabelle 2). Die Meßwerte der Nachserie fügen sich entgegen den Erwartungen nicht in den durch die übrigen jeweils 6 Meßpunkte gegebenen Verlauf ein. Hier scheint die

von der Zementcharge beeinflusste geringe Abweichung der betontechnologischen Daten für die geringere Diffusion verantwortlich zu sein.

In der Eindringgeschwindigkeit bestehen hier nur geringe Unterschiede, die auf Vorlagerung und Salzart zurückzuführen sind, wie die Diffusionskoeffizienten in Tabelle 2 anzeigen. Lediglich die Anfangsreaktion ist bei den wasser-satten Betonen verzögert, bei den lufttrockenen beschleunigt. In früheren Versuchen (16) war dagegen ein starker Einfluß der Vorlagerung festgestellt worden, allerdings an erheblich jüngeren Betonen, so daß man annehmen muß, daß der "Reifegrad" des Betons eine bedeutende Rolle spielt.

Beton- vor- lagerung	Salz- art	Regressionsgerade			Diffusions- koeffizient
		$x_0$	$\text{tg } \alpha$	Korrelations- koeffizient	
		cm			$(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^8$
unter Wasser	NaCl	-0,18	2,46	0,9972	4,4
	Misch- salz	-0,35	2,70	0,9997	5,3
an Luft	NaCl	0,46	2,79	0,9983	5,6
	Misch- salz	0,28	2,84	0,9992	6,5

Tabelle 2  
Aus den Cl-Eindringtiefen  
berechnete Regressionsge-  
raden und Diffusionskoeffi-  
zienten

Bild 7 zeigt die mittlere Masseänderung der Zylinder der Hauptserie. Da sich herausstellte, daß wesentliche Änderungen schon zu Beginn der Beaufschlagung mit Salzlösungen eintraten, wurden bei der Nachserie zusätzliche Wägungen nach 1, 4 und 9 Tagen vorgenommen (Bild 8).

Bei Versuchsbeginn enthalten die wassergelagerten Betone etwa 5,5...6,0 M.-% Feuchtigkeit, die lufttrockenen etwa 3,0...3,5 M.-%. Letztere könnten also durch Lösungsaufnahme eine Erhöhung der Masse um maximal 2,5 % aufweisen. Bereits nach einem Tag wird ein Viertel, nach 16 Tagen ungefähr die Hälfte dieses Wertes erreicht. Dann allerdings verlangsamt sich die Lösungsaufnahme bedeutend. An den mit einem Pfeil markierten Stellen weisen die Kurven Sprünge

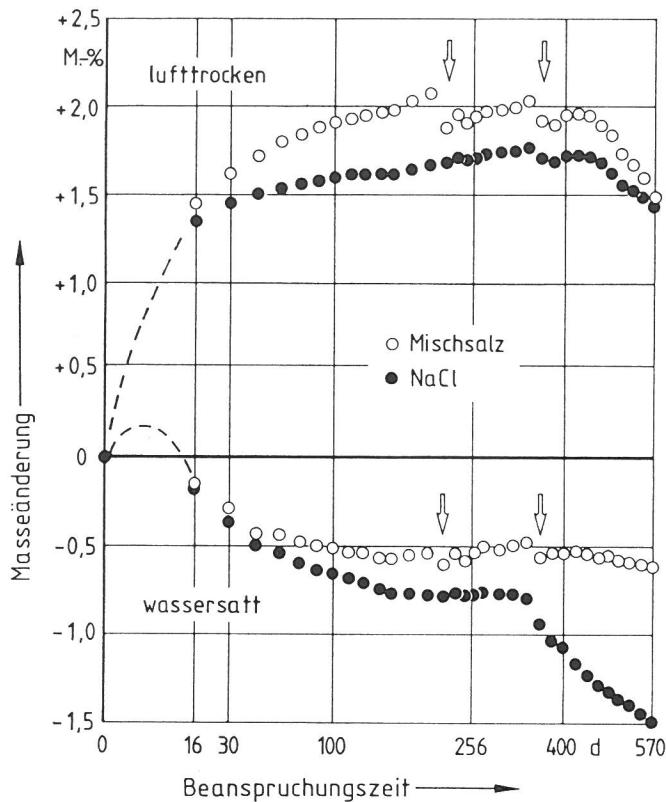


Bild 7  
Masseänderung von Betonzylindern während der Diffusionsversuche;  $\sqrt{t}$  – Maßstab; Entfernung von Kalkablagerungen an den Aufsatzringen durch Pfeile markiert

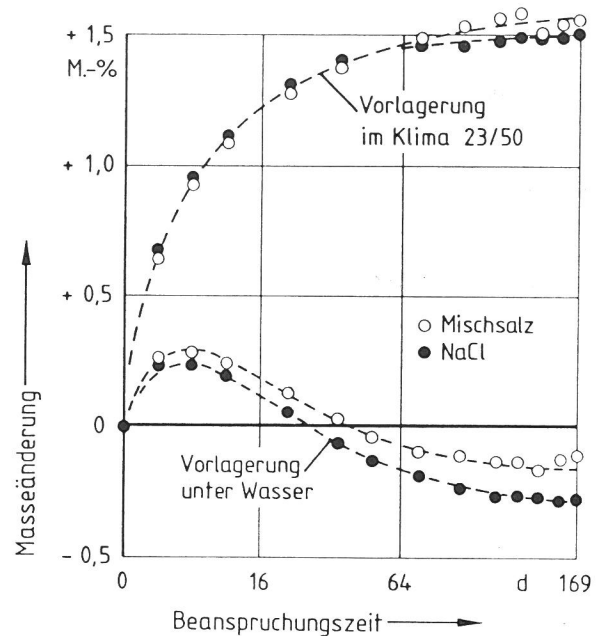


Bild 8  
Masseänderung von Betonzylindern während der Diffusionsversuche;  $\sqrt{t}$  – Maßstab

auf, die auf die Entfernung der vor allem beim Mischsalz sehr starken Kalkablagerungen an den Aufsatzringen zurückzuführen sind. Nach sehr langen Einwirkungszeiten tritt eine Abnahme der Masse auf, die z. Z. noch nicht schlüssig erklärt werden kann, aber auch in vergleichbaren Untersuchungen schon nach kürzeren Zeiträumen beobachtet worden ist (17). Vergleicht man den zeitlichen Verlauf der Lösungsaufnahme mit dem des Chlorideindringens, so stellt sich kein Zusammenhang dar. Nach 16 Tagen beispielsweise müßte den Wägungen zufolge die Lösung mindestens 50 mm tief eingedrungen sein, die gemessenen Chlorideindringtieffen dagegen liegen bei 15 mm. Wie schon im Zusammenhang mit dem kapillaren Saugen angedeutet, findet also der Transport der Chloridionen im Beton nicht durch Füllen des Kapillarporenraumes mit der Salzlösung statt. Vielmehr verursacht die Wechselwirkung zwischen Zementstein und Chloridionen den geschilderten Diffusionsvorgang, der von der Feuchtigkeitwanderung anscheinend nicht beeinflusst wird.



Die wassersatten Betone nehmen nur in der Anfangsphase geringfügig an Masse zu. Wahrscheinlich hängt dieses mit der geringen oberflächlichen Trocknung der Proben zusammen, die während der Präparation nicht zu vermeiden ist. Danach allerdings nimmt die Masse stetig ab, bei NaCl stärker als bei Mischsalz. Eine Begründung für die nach fast einjähriger Beanspruchung mit NaCl-Lösung sich wieder beschleunigende Masseabnahme kann gegenwärtig nicht gegeben werden.

Die Masseverringerung kann auf Feuchtigkeitsverluste zurückgeführt werden. An mehreren Proben wurde nach dem Sprühtest die Feuchtigkeitsverteilung ermittelt. Dazu wurden die Zylinder in jeweils 5 Scheiben gleicher Dicke zerlegt und bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Bei allen Proben fand sich ein von oben nach unten stetig abnehmender Feuchtigkeitsanteil, der den Ausgangswert im oberen Teil über- und im unteren Teil erheblich unterschritt.

### 3.1.3 Einlagerungsversuche

An Prismen, die aus Zementmörtel nach DIN 1164 hergestellt worden waren, wurde der zeitabhängige Einfluß der Salzlösungen auf die Chloridaufnahme sowie damit zusammenhängende Veränderungen im Mineralbestand des Zementsteins untersucht. Ferner dienten diese Proben der Ermittlung der daraus resultierenden Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung und das Quellen der Mörtel.

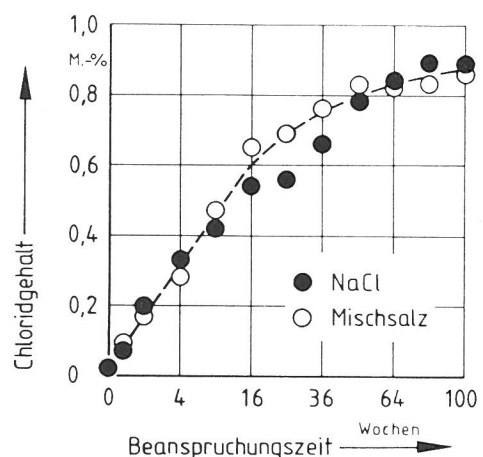
Die Prismen, für die ein handelsüblicher Portlandzement der Festigkeitsklasse Z 35 F verwendet worden war, waren an den Stirnflächen mit Schwindmeßzapfen versehen. Die Erhärtung der Mörtel erfolgte 14 Tage unter Wasser bei 21 °C und weitere 14 Tage im Normalklima 23/50. Anschließend wurden sie senkrecht hängend in NaCl- bzw. Mischsalzlösungen und zum Vergleich in Wasser gleichförmig bewegt. Die Lösungskonzentration betrug 4,0 M.-% NaCl bzw., um die gleiche  $\text{Cl}^-$ -Konzentration zu erzielen, 4,13 M.-% Mischsalz; die Lösungen wurden alle 4 Wochen erneuert. Die Temperatur lag bei 21 °C. Nach Beanspruchungszeiten von



1...700 Tagen, wobei die Intervalle nach der Wurzel-Zeit-Funktion gewählt worden waren, wurden je Lösung 3 Prismen entnommen und auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft. Anschließend wurde aus dem mittleren Bereich der Prismen eine ca. 1 cm dicke Scheibe senkrecht zur Längsachse geschnitten und auf Analysenfeinheit zerkleinert. Das Pulver diente der Chloridgehaltsbestimmung sowie der Röntgenbeugungs- und Thermoanalyse. Ferner wurde an allen Proben regelmäßig die Längenänderung gemessen.

In Bild 9 ist der Gehalt an in siedendem Wasser löslichem Chlorid, bezogen auf die Mörtelmasse, in Abhängigkeit von der Wurzel aus der Zeit aufgetragen. Der bis zur Einwirkungszeit von etwa 16 Wochen lineare Anstieg der Meßwerte deutet auf einen einfachen Diffusionsvorgang hin, während im anschließenden Zeitraum vermutlich nur noch das Konzentrationsgefälle innerhalb der Mörtelprismen sich auszugleichen bestrebt ist und damit die Chloridaufnahme sich stark verlangsamt. Die Kurve scheint einem Sättigungswert zuzustreben, der knapp unter 1,0 M.-%, d. h. etwa 4,5 M.-% auf den Zementanteil bezogen, liegt. Die Differenzen zwischen den Werten der NaCl-Serien und denen der Mischsalzserien liegen innerhalb der Prüfstreuung.

Bild 9  
Chloridaufnahme von Zementmörtelprismen während der  
Einlagerung in Salzlösungen (4 %);  $\sqrt{t}$  - Maßstab



Das Chlorid wird z. T. in dem als "Friedelsches Salz" bezeichneten Calciumchloroaluminathydrat gebunden, dessen Anteil thermoanalytisch aus der Entwässerungsstufe des beim Erhitzen als Zwischenprodukt entstehenden Hydrograts indirekt ermittelt wurde (17). Wenngleich die Auswertung mit erheblichem relativem Fehler verbunden ist, so läßt die Auftragung der Werte (Bild 10) doch erkennen, daß

dieses Mineral während der ersten Wochen rasch zunehmend, dann jedoch deutlich langsamer gebildet wird. Der zeitliche Verlauf der Entstehung von Friedelschem Salz korreliert nicht mit der Chloridaufnahme, die mit anhaltend höherer Geschwindigkeit fortschreitet. Nach 100 Wochen wird ein Wert von annähernd 2 M.-% an Friedelschem Salz erreicht. Darin sind nur ca. 0,25 % Chlorid enthalten; weitere 0,3 % könnten theoretisch allein durch Füllen der Poren mit der Ausgangslösung eingebracht werden. Bei dem nach 100 Wochen gefundenen Chloridgehalt von rd. 0,9 %

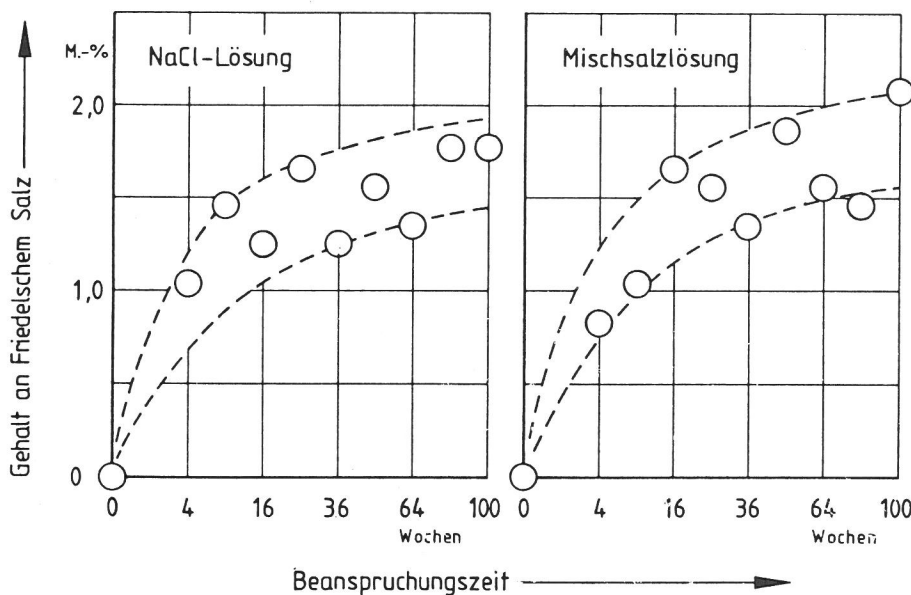
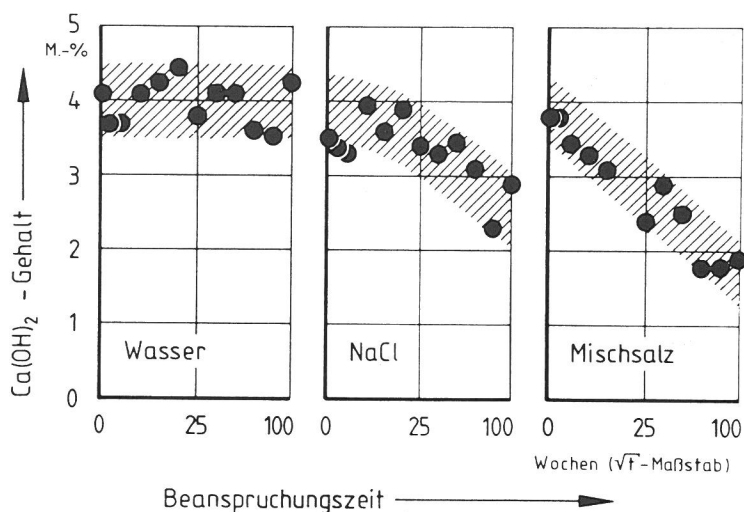


Bild 10  
Bildung von Friedelschem Salz in  
Zementmörteln während der Ein-  
lagerung in Salzlösungen (4%);  $\sqrt{t}$  -  
Maßstab

müssen daher mehr als 0,3 %  $\text{Cl}^-$  anderweitig gebunden sein. Hier ist in erster Linie an ein ettringitähnliches Mineral zu denken, wie in einer früheren Arbeit gezeigt wurde (18).

Streuungen weisen auch die thermoanalytisch ermittelten Werte für den Gehalt an Calciumhydroxid auf. Dennoch kann aus der Vielzahl der Werte (Bild 11) eindeutig erkannt werden, daß bei langandauernder Einwirkung von Tausalzlösungen der Anteil dieses wichtigen Minerals sinkt, und zwar bei Mischsalzlösungen stärker und schneller als bei solchen mit Natriumchlorid, während bei Wasserlagerung die Werte - innerhalb eines Streubereichs - gleichbleiben. Rechnet man die auf die Mörtelmasse bezogenen Werte auf den Zementgehalt um, ergibt sich eine durch 100-wöchige Einwirkung von Tausalzen bei Raumtemperatur verursachte

Bild 11  
Calciumhydroxidgehalte von Zementmörteln während der Einlagerung in Wasser bzw. Salzlösungen (4%)



Reduktion des Calciumhydroxidgehaltes von etwa 18 M.-% auf 8...12 M.-%.

Die röntgendiffraktometrischen Aufnahmen bestätigten die thermogravimetrisch gewonnenen Ergebnisse.

Die Auswirkung der Dauereinlagerung auf die Festigkeitsentwicklung ist in Bild 12 und 13 dargestellt, wobei als Bezugswert jeweils die mittlere Festigkeit der Prüfserien unmittelbar vor Beginn der Beanspruchung gewählt ist. Die Biegefestigkeit steigt bei allen Proben rasch an, da durch die Flüssigkeitsaufnahme der luftgetrockneten Proben im oberflächennahen Bereich Druckspannungen entstehen. Während im weiteren Verlauf die wassergelagerten Prismen infolge der Nacherhärtung leicht steigende Biegefestigkeiten erreichen, sinken diese bei Salzeinwirkung unter die Ausgangswerte ab. Die Druckfestigkeit sinkt bereits einen Tag nach der Einlagerung auf Werte um 85 %, um gleich danach durch Spannungsabbau infolge gleichmäßigerer Durchfeuchtung wieder anzusteigen. Eine schwach abnehmende Tendenz bei den wassergelagerten Proben nach sehr langen Zeiträumen dürfte darauf zurückzuführen sein, daß durch den regelmäßigen Wechsel des Wassers eine gewisse Auslaugung stattgefunden hat, deren Wirkung sich der Nacherhärtung stärker überlagert. Die den Salzlösungen ausgesetzten Mörtel weisen dagegen schon nach 36 Wochen deutlich sinkende Druckfestigkeiten auf, wobei nach 100 Wochen ein Ende der Abnahme noch nicht zu erkennen ist. Insgesamt kann man feststellen, daß die Festigkeitsminderung durch dauernde Ein-

wirkung von Tausalzlösungen zwar nicht die Standsicherheit unmittelbar gefährdende Ausmaße erreicht, aber dennoch deutlich nachweisbar ist. Die Mischsalzlösung bewirkt dabei stärkere Abnahmen sowohl der Biegezugfestigkeit als auch der Druckfestigkeit als die NaCl-Lösung gleicher Chloridkonzentrationen.

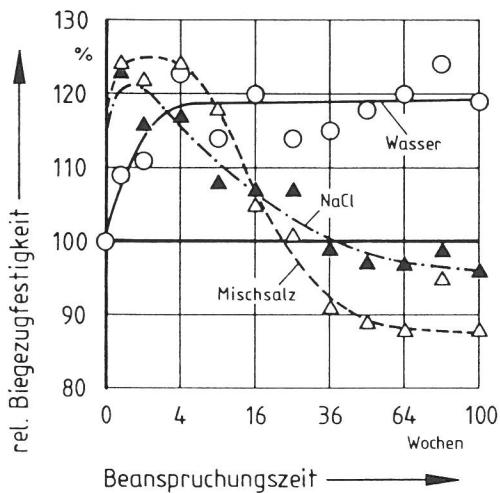


Bild 12  
Zeitliche Änderung der Biegezugfestigkeit von Zementmörteln, bezogen auf den Ausgangswert, infolge der Einlagerung in Wasser bzw. Salzlösungen (4%);  $\sqrt{t}$  - Maßstab

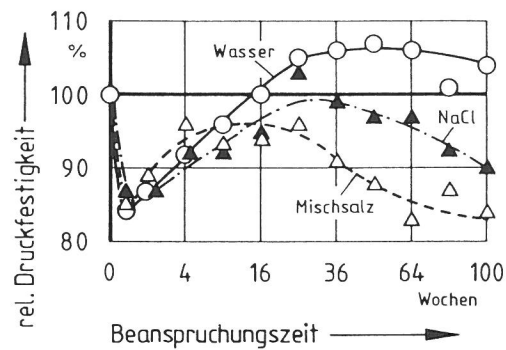


Bild 13  
Zeitliche Änderung der Druckfestigkeit von Zementmörteln, bezogen auf den Ausgangswert, infolge der Einlagerung in Wasser bzw. Salzlösungen (4%);  $\sqrt{t}$  - Maßstab

In Bild 14 ist die lineare Dehnung der Prismen über der Wurzel aus der Zeit aufgetragen. Nach der Einlagerung der lufttrockenen Proben dehnen sich alle durch Flüssigkeitsaufnahme innerhalb kurzer Zeit um ca. 0,25 % aus. Die anschließende verlangsamte Längenänderung erreicht bei den wassergelagerten Prismen nach 100 Wochen den Wert 0,4 %, der erfahrungsgemäß in der Größenordnung dem Endwert

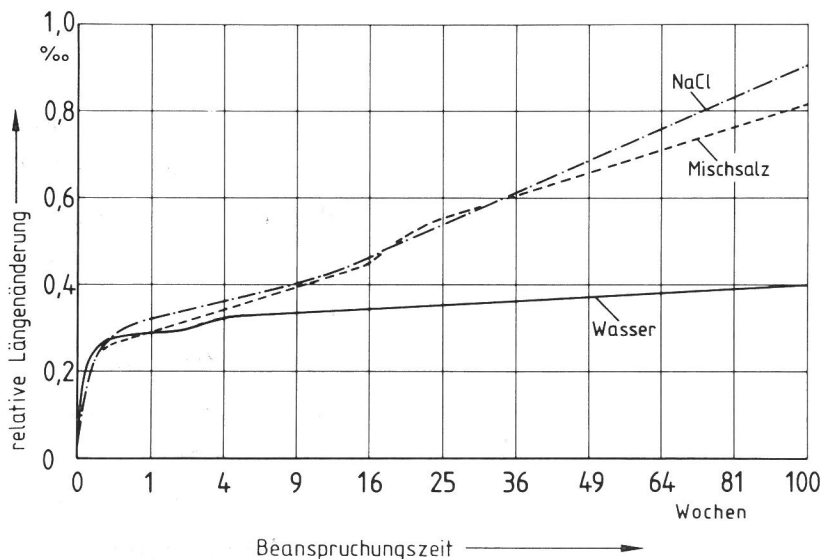


Bild 14  
Lineare Dehnung von Zementmörteln infolge der Einlagerung in Wasser bzw. Salzlösungen (4%);  $\sqrt{t}$  - Maßstab

gleichkommt. Die salzbeanspruchten Proben weisen dagegen doppelt so hohe Dehnungen auf, die nach 100 Wochen bereits 0,82 ‰ (Mischsalz) bzw. 0,90 ‰ (NaCl) betragen und kein Abklingen dieses Vorgangs erkennen lassen. Die Dehnungen können auf die Mineralneu- und -umbildungen, insbesondere der ettringitähnlichen Phasen, zurückzuführen sein. Auch dürften sie mit der Festigkeitsentwicklung im Zusammenhang stehen. Die in der Darstellung zu erkennenden ungleichförmigen Kurvenverläufe in bestimmten Zeitabschnitten, z. B. 16. - 25. Woche bei Mischsalzeinwirkung, können noch nicht erklärt werden, wurden aber auch schon in anderen vergleichbaren Untersuchungen gefunden.

Außer den Mörtelprismen waren aus zuschlagfreier Zementpaste unter Verwendung des gleichen PZ 35 F Prismen der Größe 1 cm x 1 cm x 10 cm hergestellt worden. Hieran sollen langfristig Veränderungen der Mineralphasen durch die Einwirkung von NaCl- und Mischsalzlösungen in Abhängigkeit von deren Konzentration untersucht werden. Da diese Versuche über den Rahmen des Vorhabens hinausgehen, wird über die Ergebnisse zu gegebener Zeit berichtet werden. Zwischenergebnisse können aber schon hier in die Betrachtungen einbezogen werden.

Nach dreijähriger Einlagerung wurden an einigen Zementsteinproben der  $\text{Cl}^-$ -Gehalt sowie die Anteile an Friedelschem Salz, Ettringit und Calciumhydroxid bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 15 bis 18 aufgetragen. Die Chloridaufnahme nimmt mit steigender Lösungskonzentration unterproportional zu (Bild 15). Die Bildung des als Friedelsches Salz bezeichneten Chloroaluminats wird im unteren Konzentrationsbereich sehr stark beeinflusst, während oberhalb von 8 ‰ kaum noch eine Zunahme beobachtet werden kann (Bild 16). Die Ettringitbildung (Bild 17) wird, wie in anderen Untersuchungen bereits dargestellt (18), durch die Chloridaufnahme ganz erheblich begünstigt. Man kann annehmen, daß es sich dabei um Mischkristalle  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3(\text{CaSO}_4, \text{CaCl}_2) \cdot 3\text{OH}_2\text{O}$  handelt. Die Darstellung läßt eine stärkere Förderung der Ettringitbildung im niedrigen Konzentrationsbereich tendenziell erkennen. Der  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Anteil nimmt mit steigender Lösungskonzentration

kontinuierlich ab, wobei noch zu klären ist, ob die bei 20 % Salzgehalt gemessenen Differenzen zwischen den Salzarten hier zufallsbedingt sind, zumal nur eine Probe analysiert worden war (Bild 18). Insgesamt kann man feststellen, daß auch hier keine signifikanten Unterschiede zwischen Natriumchlorid- und Mischsalzeinwirkung auftreten.

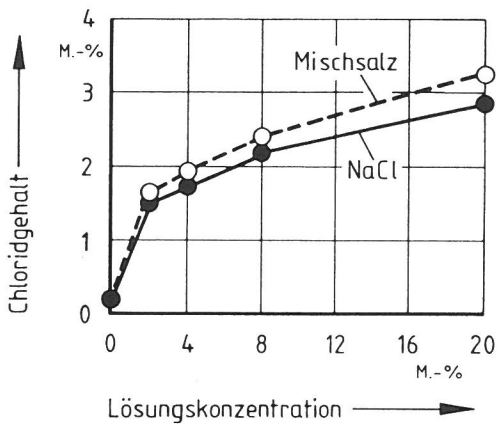


Bild 15  
Chloridgehalt von Zementsteinproben nach 3jähriger Lagerung in Salzlösungen unterschiedlicher Konzentration

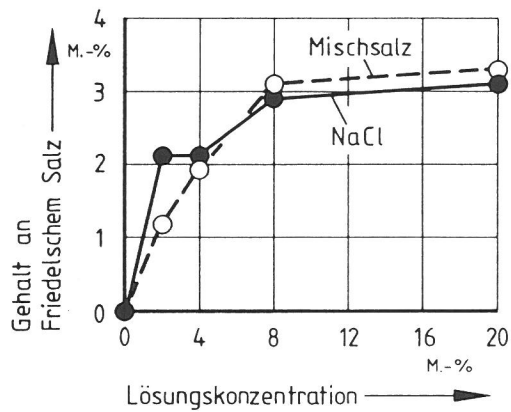


Bild 16  
Gehalt an Friedelschem Salz im Zementstein nach dreijähriger Lagerung in Salzlösungen

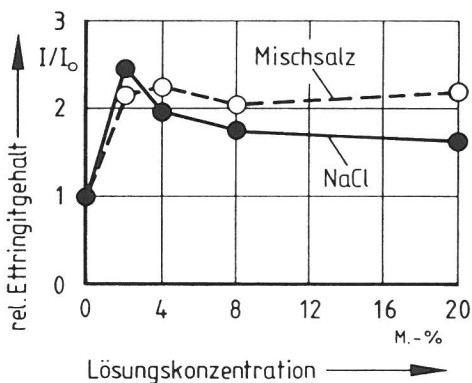


Bild 17  
Relativer Ettringitgehalt (nach Röntgenbeugungsintensitäten I) von Zementstein nach dreijähriger Lagerung in Salzlösungen

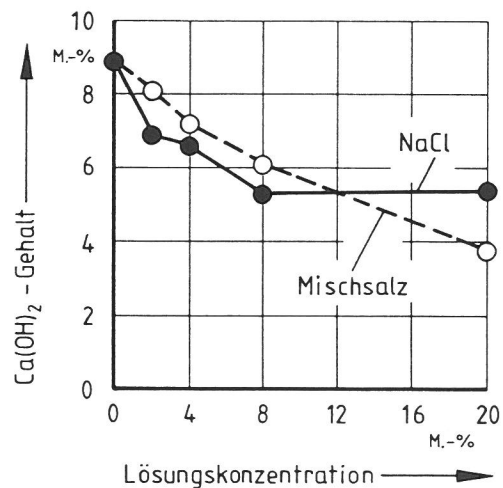


Bild 18  
Calciumhydroxidgehalte von Zementstein nach dreijähriger Lagerung in Salzlösungen

Die rasterelektronenoptischen Aufnahmen von Bruchflächen der Zementsteinproben zeigten kaum salzart- und konzentrationsabhängige Besonderheiten, geben aber Einblicke in das Kristallgefüge. Die in den Bildern 19 bis 30 gezeigten Minerale waren mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDAX) identifiziert worden. Zur Probenbezeichnung dienten "N" für Natriumchlorid-, "M" für Mischsalzlösung



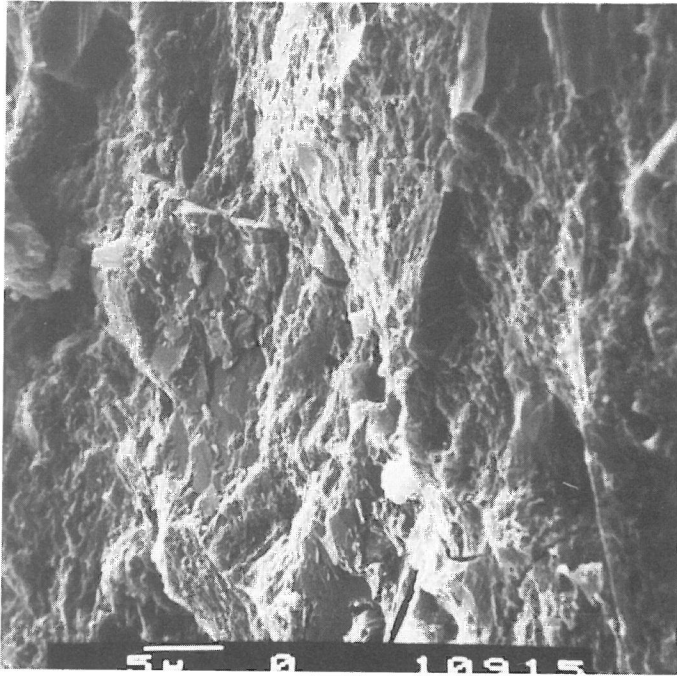


Bild 19  
REM-Aufnahme von Zementstein mit dichtem Gefüge, i. w. Calciumsilicathydrat enthaltend; Probe 0

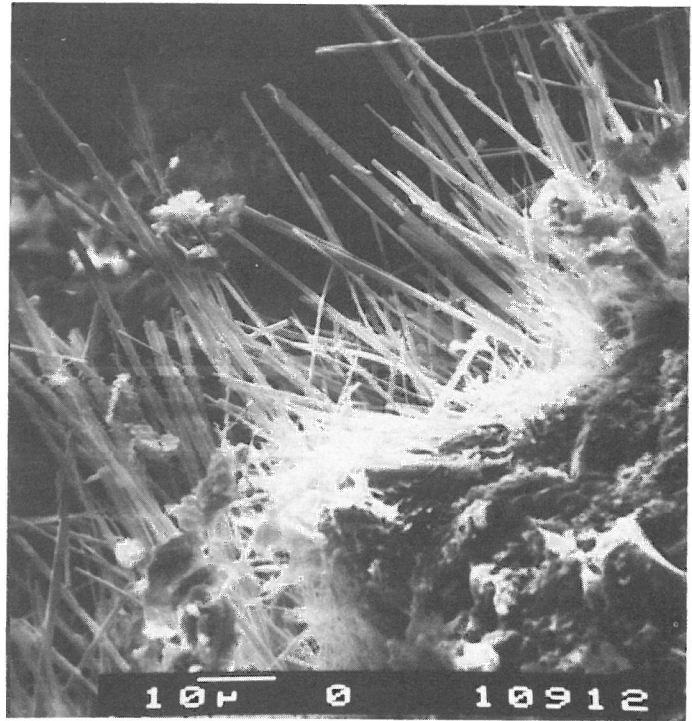


Bild 20  
REM-Aufnahme von Ettringitnadeln; Probe 0

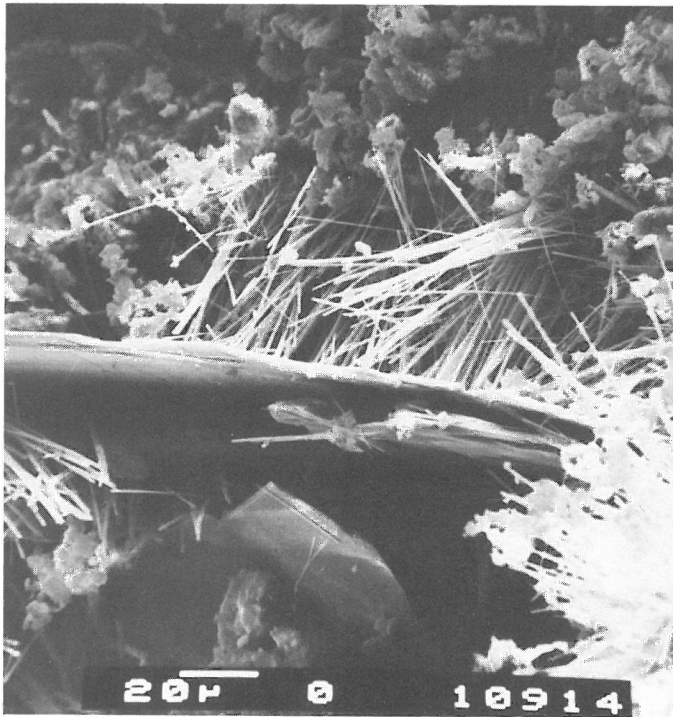


Bild 21  
REM-Aufnahme von Ettringitnadeln zwischen Calciumhydroxidtafeln und feinkristallinen Calciumsilicathydraten; Probe 0

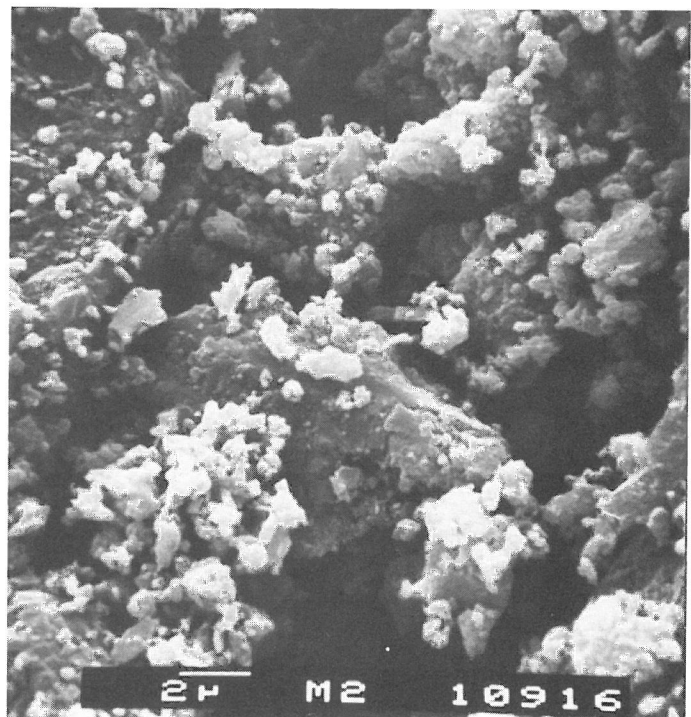


Bild 22  
REM-Aufnahme von chloridhaltigen mikrokristallinen Calciumsilicathydraten; Probe M 2

sowie der Zahlenwert der Konzentration als zu sätzliche Kennziffer. Die Probe 0 war in Wasser eingelagert.

Die ersten drei Bilder zeigen übliche Gefügemerkmale mit Calciumsilicathydraten in sehr dichter (Bild 19) oder feinkristalliner (Bild 21), an anderer Stelle auch in

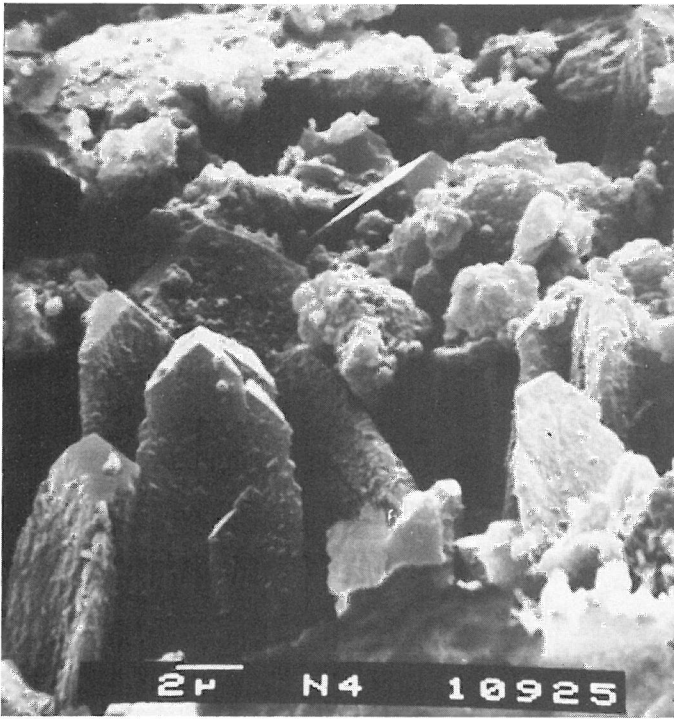


Bild 23  
REM-Aufnahme von kompakten Calciumhydroxid-Kristallen;  
Probe N 4

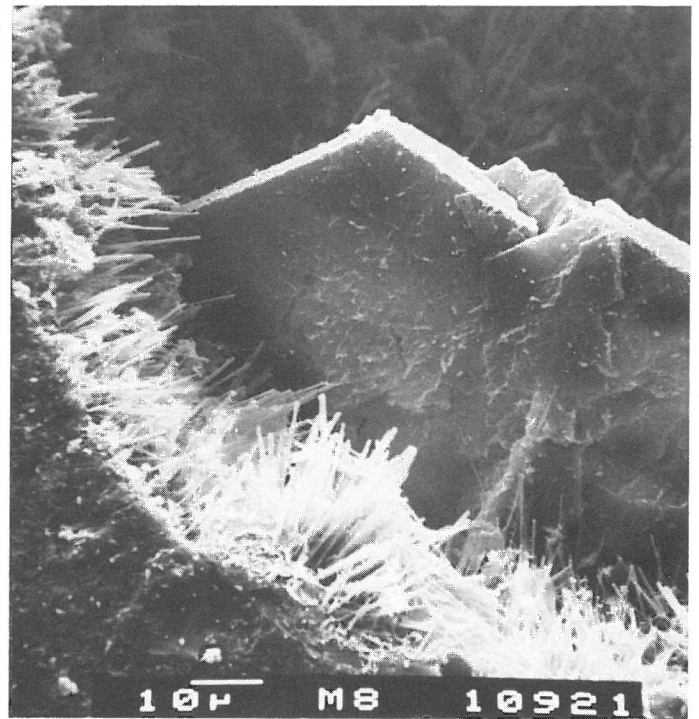


Bild 24  
REM-Aufnahme von Calciumhydroxid-Kristallen und Calcium-  
silicathydrat-Büscheln am Rande einer Pore; Probe M 8

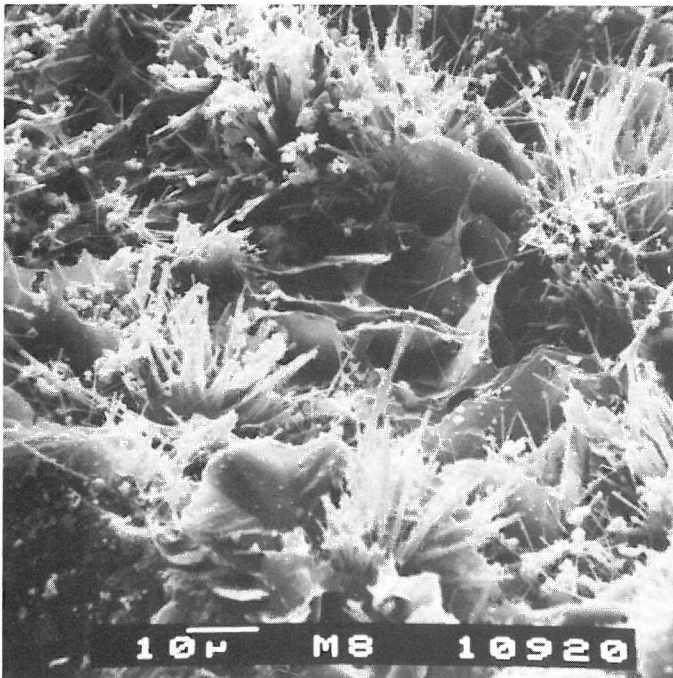


Bild 25  
REM-Aufnahme von Verwachsungen von faserigen Calciumsili-  
cat und -aluminathydraten mit Calciumhydroxid; Probe M 8

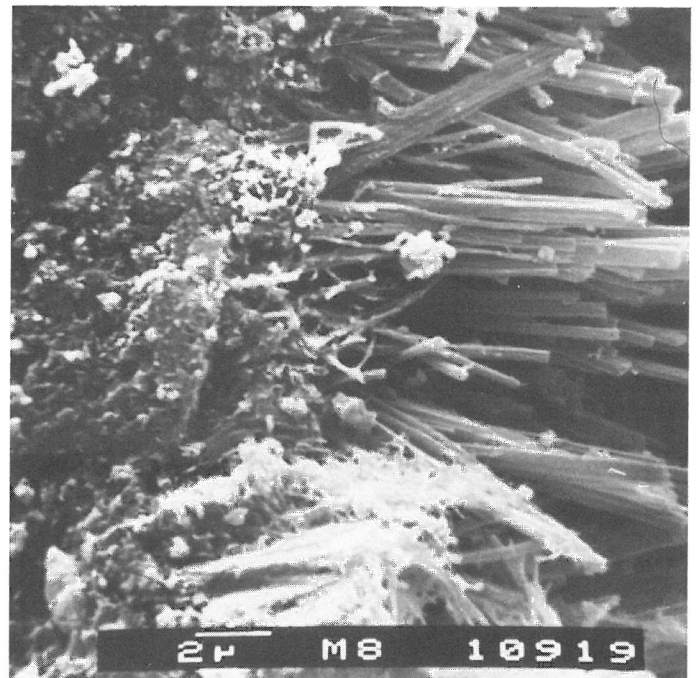


Bild 26  
REM-Aufnahme von chloridhaltigen Calciumsilicathydrat-  
Büscheln am Rande einer Pore; Probe M 8

langfasriger Form, ferner lange Ettringitnadeln (Bild 20 und 21) vor allem in Poren, häufig mit großen Calciumhydroxid-Tafeln verbunden. Die chloridhaltigen Zementsteine weisen häufig Kristallformen mit weniger klaren Umrissen (Bild 22), aber auch sehr kompakten Calciumhydroxidausscheidungen in Poren (Bild 23 und 24) auf. Die faserigen Calciumsilicathydrate enthalten teilweise Chlorid (Bild 25





Bild 27  
REM-Aufnahme eines chloridfreien Calciumsilicathydrat-Büschels mit Calciumhydroxid-Tafeln; Probe M 20



Bild 28  
REM-Aufnahme von NaCl-Ausscheidungen in Ettringit-Büscheln; Probe N 20

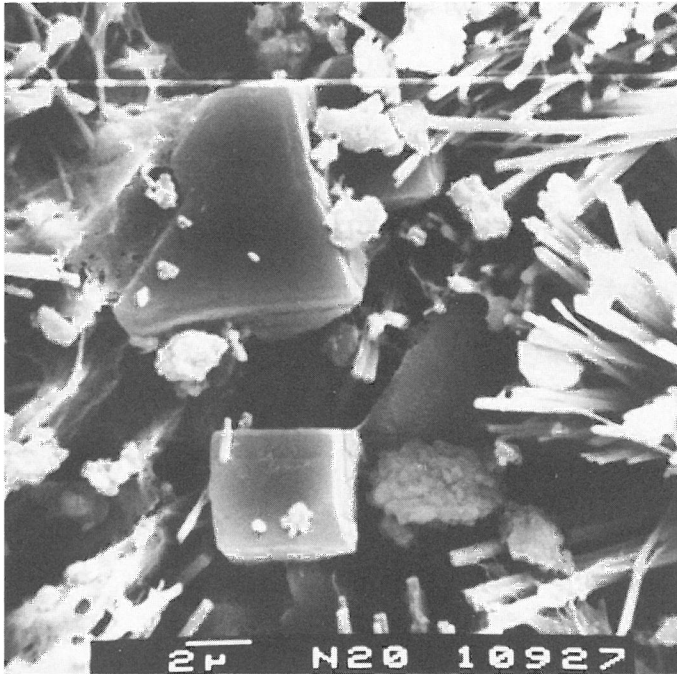


Bild 29  
REM-Aufnahme von CaCl<sub>2</sub>-Ausscheidungen in Ettringit-Büscheln mit mikrokristallinen Calciumsilicathydraten; Probe N 20

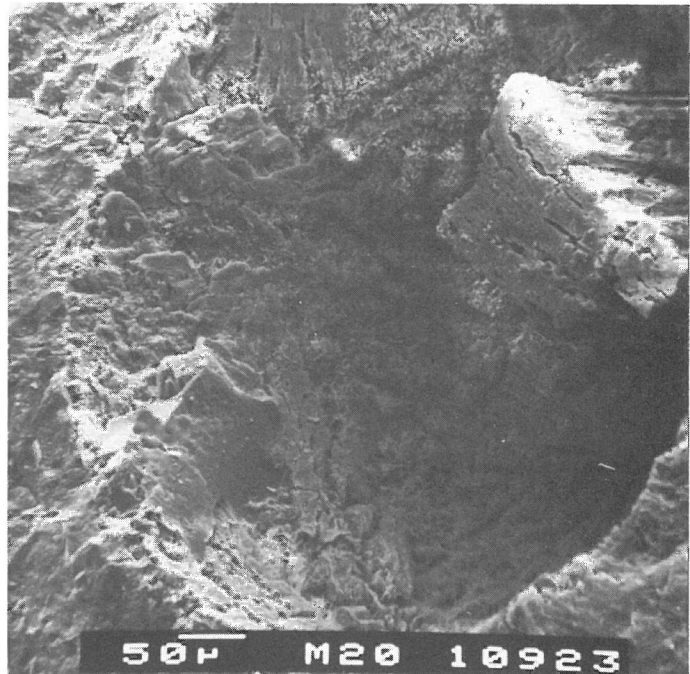


Bild 30  
REM-Aufnahme einer Pore mit kompakter Calciumchlorid-Ausscheidung (rechts oben) und randlichen Chloridanreicherungen (glatter Bereich links unten); Probe M 20

und 26); insgesamt finden sie sich häufiger in Büscheln oder Rosetten (Bild 27), in die gelegentlich - bei hoher Lösungskonzentration - NaCl-Ausscheidungen eingelagert sind (Bild 28 und 29). CaCl<sub>2</sub>-Ausscheidungen sind nur vereinzelt zu finden; sie liegen in kompakter Form oder als Belag in Poren vor (Bild 30).

### 3.2 Frost-Tau-Wechsel-Versuche

#### 3.2.1 Befrostung von Betonwürfeln in den Salzlösungen

In Frost-Tau-Wechsel-Versuchen ist i.a. die stärkste Schädigung der Betone zu erwarten, wenn die Proben in den Tausalzlösungen lagernd befrosten und aufgetaut werden. Um in begrenzten Zeiträumen Aufschluß über die Wirkung der beiden Salzarten in verschiedenen Konzentrationen zu erhalten, wurde daher ein Prüfverfahren angewandt, das FREY, SIEBEL und WERSE (19) beschreiben. Nach dieser Methode werden je 2 Betonwürfel von 10 cm Kantenlänge in einen Messingbehälter mit den Innenmaßen 12 x 14 x 34 cm<sup>3</sup> auf einen Rost gelegt; der Behälter wird mit der Lösung so gefüllt, daß der Flüssigkeitsspiegel 1...2 cm über der oberen Fläche der Proben steht. Der verschlossene Behälter wird im Frostraum tiefen Temperaturen ausgesetzt.

Abweichend von der in der Literatur genannten Verfahrensweise erfolgte das Auftauen nicht im Wasserbad, sondern in Raumluft, die zur Beschleunigung des Vorgangs in der ersten Versuchsreihe mittels eines Heizlüfters umgewälzt wurde. Ferner wurden mit beiden Salzen Lösungen der Konzentration 4, 8 und 20 M.-% sowie zum Vergleich Leitungswasser verwendet. Der Temperaturverlauf wurde mit Hilfe von Pt-100-Fühlern, die mittig in zwei Würfeln im wassergefüllten Behälter angebracht waren bzw. in das Wasser und die 20%ige NaCl-Lösung eintauchten, fortlaufend registriert. Die Temperatur des Frostraumes lag bei -15 °C, die Auftautemperatur um +20 °C. Nach bestimmter Anzahl von Frost-Tau-Wechseln (FTW) wurden die Betonproben nach Abbürsten loser Teile gewogen und anschließend in frischen Salzlösungen weiterbeansprucht.

In zwei Serien wurden jeweils 90 Betonwürfel hergestellt, für die ein Portlandzement Z 35 F und quarzitischer Zuschlag der Sieblinie B<sub>16</sub> (gemäß DIN 1045) Verwendung fanden. Der Zementgehalt betrug 300 kg pro m<sup>3</sup> Beton, der Wasserzementwert 0,60. Tabelle 3 enthält die Festigkeitswerte sowohl aus der Prüfung nach DIN 1048, mit der üblicherweise die Betonqualitäten gekennzeichnet werden, als auch aus den Prüfungen nach 4wöchiger Wasserlagerung bzw.

unmittelbar vor Beginn der FTW-Versuche. Der Beton, der von der Zusammensetzung her als Standardbeton bezeichnet werden kann, liegt hinsichtlich der Festigkeit erheblich über den Anforderungen, die an die Festigkeitsklasse B 25 gestellt werden.

Lagerungsart	Alter der Würfel zur Zeit der Prüfung	Serie I	Serie II
	d	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Lagerung nach DIN 1048	28	37,0 (35,4)*	34,2 (34,2)*
Vorlagerung unter Wasser	28	33,7	34,5
anschließende Lagerung			
unter Wasser	108 142	- 37,9	38,5 -
im Klima 20/65	108 142	- 42,4	42,0 -

Tabelle 3  
Festigkeitswerte der 10-cm-Beton-  
würfel

\* ermittelt an 15-cm-Würfeln

Da aus der Literatur und eigenen Versuchen bekannt war, daß die Nachbehandlung des Betons und die Nacherhärtungsdauer Einfluß auf die Frosttausalzbeständigkeit haben, war für beide Serien nach jeweils 4wöchiger Wasserlagerung eine weitere, ausreichend lange Lagerung unter Wasser bzw. im Normalklima 20/65 gewählt worden. Die i. F. als "lufttrocken" bezeichneten Proben enthielten nach Abschluß der Vorlagerung nur noch 50 % der Wassermenge, die die "wassersatten" bei der Trocknung bei 105 °C abgaben. Der Gehalt an verdampfbarem Wasser betrug bei letzteren etwa 6,3 M.-%, was einer offenen Porosität von 14 % entspricht.

Der zeitliche Ablauf der FTW für die Würfelserie I sah 5 Zyklen pro Woche vor. Dabei verblieben die Behälter jeweils 16...17 h im Frostraum und 7...8 h bei Raumtemperatur. Über die Wochenenden verlängerten sich die Frost-

perioden um 48 h auf etwa 64 h. Während dieser Zeit sank auch die Temperatur in der Mitte der Würfel auf  $-13...-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab, und zwar für mindestens 40 h. In den übrigen 4 Zyklen je Woche wurden in den im Wasserbad befindlichen Würfeln nur Temperaturen zwischen  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht, da infolge der Eisbildung die Abkühlkurve für jeweils 10...12 h bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  verharrte. Aus dem gleichen Grunde stiegen beim Auftauvorgang die Temperaturen hier nur auf Werte um  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Da in den Salzlösungen geringere Eismengen gebildet wurden, dürften die Temperaturdifferenzen dort größer gewesen sein.

Die zu Beginn der Beanspruchung wassersatten Würfel, die in Salzlösungen befrosten wurden, zeigten bereits nach 5 FTW Schädigungen in Form abgewitterter Oberflächen und Kanten. Bei den lufttrockenen Betonen traten diese Erscheinungen erst später auf, waren nach 15 FTW allerdings schon sehr deutlich. Fast alle in 20%igen Lösungen beanspruchten Würfel wiesen zu diesem Zeitpunkt schon starke Risse auf, deren Größe im weiteren Verlauf zunahm.

Die Bilder 31 und 32 zeigen Proben nach Abschluß der Versuche nach insgesamt 45 Zyklen. Ein Teil der in 8%iger Lösung behandelten Proben war bereits völlig zerstört, während die nur dem Wasser ausgesetzten Betone, die zuvor wassergesättigt worden waren, lediglich die äußere Zementschlämmeschicht verloren haben, die lufttrockenen sogar gänzlich unversehrt erscheinen. Der in 20%iger Lösung behandelte anfangs lufttrockene Beton wies noch weitgehend ungeschädigte Würfelflächen und Kanten auf, war jedoch aufgequollen und von wenigen ausgeprägten Rissen durchzogen. Die wassersatte Probe war darüber hinaus oberflächlich abgewittert.

In Bild 33 ist die relative Masse der Betonwürfel, bezogen auf die Masse vor Beginn der Frostbeanspruchung, in Abhängigkeit von der Anzahl der FTW aufgetragen; die dargestellten Mittelwerte resultieren aus je 4 Einzelwerten. Alle lufttrockenen Proben nehmen im Anfangszeitraum ca. 3 M.-% Wasser oder Lösung auf. Die weitere Behandlung in Wasser verändert diesen Wert praktisch nicht. In 20%iger



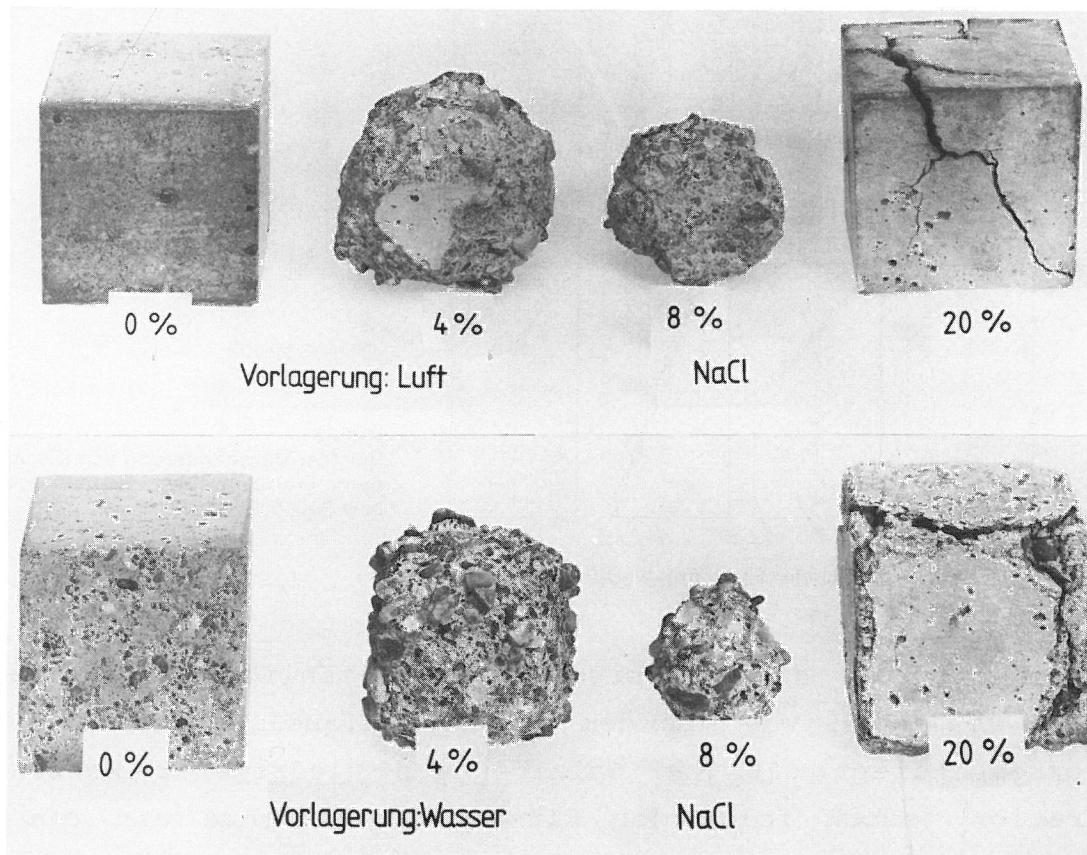


Bild 31  
Unterschiedlich vorgelagerte Betonwürfel nach der Beanspruchung durch Frosttauwechsel in NaCl-Lösungen von unterschiedlicher Konzentration

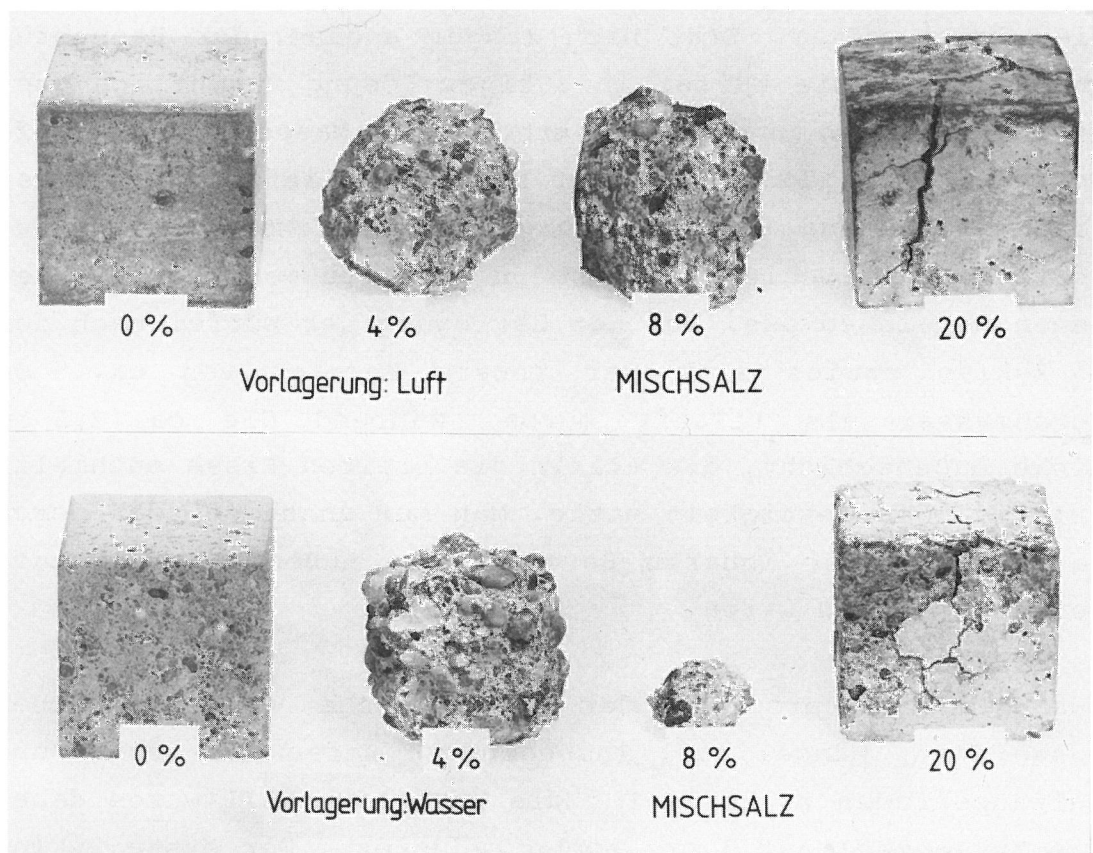


Bild 32  
Unterschiedlich vorgelagerte Betonwürfel nach der Beanspruchung durch Frosttauwechsel in Mischsalz-Lösungen unterschiedlicher Konzentration

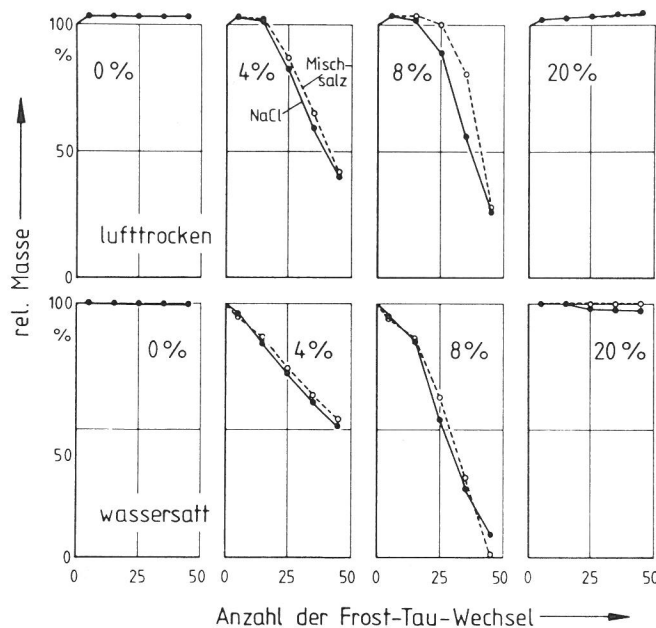


Bild 33  
Relative Masseänderung von 10-cm-Betonwürfeln  
durch Frostaustauwechsel-Beanspruchung in Wasser  
bzw. Salzlösungen

Lösung steigt die relative Masse allmählich weiter auf fast 105 % an, was mit dem starken Aufquellen der Proben korrespondiert. In den Salzlösungen niedrigerer Konzentration jedoch folgt der Flüssigkeitsaufnahme ein rasch zunehmender Masseverlust. Dieser setzt bei den wassersatten Betonen schon nach den ersten FTW deutlich ein. In 0- und 20%iger Lösung dagegen bleibt eine Schädigung auch hier kaum meßbar. Erst nach länger andauernder Beanspruchung würden die Würfel in 20%iger Lösung vermutlich auseinanderbrechen und somit erhebliche Masseverluste aufweisen. Die Schädigung dieser Proben verlief nicht wie bei denen in 4- und 8%iger Lösung durch Abscherbeln der jeweils äußeren Schichten, sondern erfolgte von tiefer gelegenen Bereichen aus. Bei der Zerlegung der Würfel nach den 45 Zyklen erwies sich der innere Bereich von ca. 5 cm Durchmesser als relativ mürbe, während die ca. 2,5 cm dicke Außenschicht, die allein die breiten Risse enthielt, relativ hohe Festigkeit hatte. Man muß annehmen, daß durch das Quellen der inneren Bereiche die Außenschichten aufgerissen worden waren.

Das Temperaturprogramm der FTW-Versuche wies, wie oben ausgeführt, Mängel auf, insbesondere waren die Frost- und Auftauperioden zu kurz. Für die Würfelserie II wurde daher die Zyklenzahl auf 3 pro Woche reduziert. Der erste Zyklus (jeweils am Wochenende) umfaßte 68 h Frost und 23 h Auftauen, der zweite 10 h Frost und 22 h Auftauen, der dritte

21 h Frost und 24 h Auftauen. Somit war die Verweildauer bei Raumtemperatur nahezu gleichbleibend und ausreichend, ohne zusätzliche Maßnahmen völliges Auftauen aller Proben zu gewährleisten. Die Frostperioden mußten aus arbeits-technischen Gründen unterschiedlich lang gewählt werden, wobei allerdings nur jeder 3. Zyklus zu kurz für völliges Absenken der Temperatur auf die des Frostraumes war. Andererseits folgten dem jeweils die beiden langen Frostperioden. Dieses Temperaturprogramm dürfte den in der Praxis vorherrschenden Witterungsbedingungen näher kommen als der in Laborversuchen übliche zweimalige Temperaturwechsel pro Tag, der für Serie I angewandt worden war.

Trotz des veränderten Temperaturwechselprogramms waren Schadensbild und Schädigungsverlauf sehr ähnlich, wie Bild 34 zeigt. Bezogen auf die Zyklenzahl scheint die

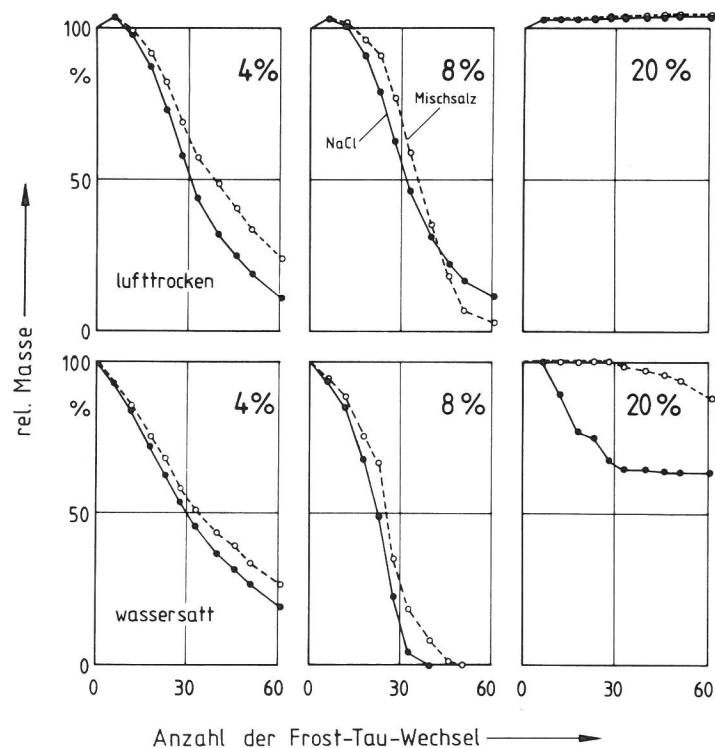


Bild 34  
Relative Masseänderung von 10-cm-Betonwürfeln durch Frosttauwechsel-Belastung in Salzlösungen („langer Zyklus“)

Korrosion hier schneller abzulaufen; berücksichtigt man aber die jeweilige Zyklendauer - 3 Zyklen pro Woche anstelle der 5 Zyklen im ersten Programm -, so ergibt sich ein vergleichbarer Zerstörungsfortschritt. Nur die wassersatten, in 20%igen Lösungen beanspruchten Betone wiesen außer den starken Rissen und Aufquellungen allmähliche (beim Mischsalz) bzw. abrupte (bei NaCl) Abscherbelagen auf. Die nur in Wasser den Frosttauwechseln unterzogenen

Proben zeigten auch nach den 20 Wochen dauernden 60 Zyklen außer dem Ablösen der Zementschlammeschicht der wassersatten Proben keine Zerstörungerscheinungen. Sie wurden daher in die Darstellung nicht mehr einbezogen. Nur die der Temperaturkontrolle dienenden Würfel, die für beide Programme verwendet worden waren, waren oberflächlich geringfügig stärker abgewittert.

Um den Einfluß der Vorlagerung der Betone zu verdeutlichen, ist in Bild 35 die Abtragsrate, d. h. die Verringerung der ursprünglich etwa 2.300 g umfassenden Masse der Würfel je Zyklus, in Abhängigkeit von der Zyklenzahl für die in 4%iger NaCl-Lösung beanspruchten Proben aufgetragen. Man erkennt den raschen Anstieg der Abtragsrate für

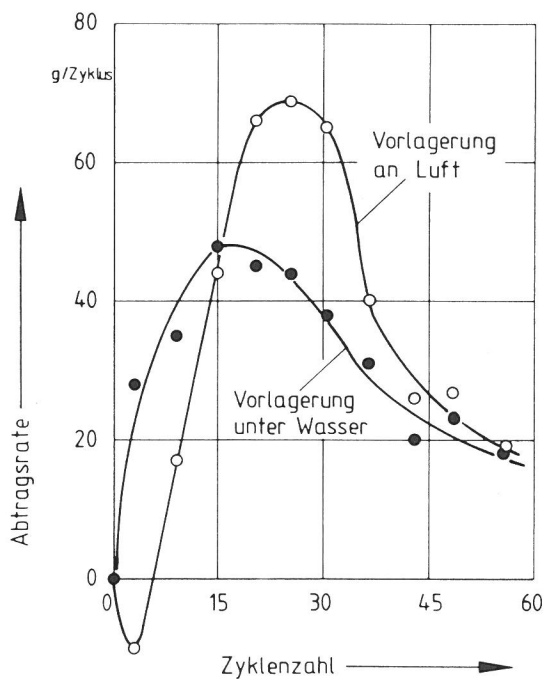


Bild 35  
Frosttauwechselbedingte Abtragsgeschwindigkeit  
von 10-cm-Betonwürfeln in 4%iger NaCl-Lösung

die wassersatten Proben bis zu dem bei 15 Zyklen liegenden Maximum und die anschließende Abnahme der Zerstörungsgeschwindigkeit. Die lufttrockenen Betone erreichen - nach vorübergehender Massezunahme - erst später das Maximum der Abtragsrate, das dann allerdings wesentlich höher ist. Die partielle Austrocknung verzögert also nur die Schädigung durch Frost- und Tausalzangriff, vermindert sie jedoch nicht. Ebenso scheint das Mischsalz den Zerstörungsvorgang i. d. R. zu verzögern, ohne sein Ausmaß letztlich zu beeinflussen, wie aus der Gesamtheit der Versuche zu folgern ist.



In ergänzenden Versuchen sollte die Chlorideindringtiefe ermittelt werden. Aus den Ergebnissen, die 6 bei Raumtemperatur in verschiedenen Lösungen eingelagerte Würfel lieferten, konnte der Einfluß der Salzart und der Konzentration nicht eindeutig abgeleitet werden. Es wurden nach 17-wöchiger Einlagerung Penetrationstiefen von 20...28 mm ermittelt. Diese können nur bedingt mit den Korrosionsabläufen der geschilderten FTW-Versuche in Korrelation gebracht werden, da dort die Oberfläche der Proben sich kontinuierlich dem Kern näherte (in 4%- und 8%ige Lösungen) bzw. durch die starken Risse sich neue Angriffsflächen bildeten (20%ige Lösung). Drei weitere Würfel wurden nach 4 monatiger Vakuumtrocknung mit Wasser und Lösungen mit 4 % und 20 % NaCl bei Unterdruck über einen Zeitraum von 14 Wochen getränkt. Die Flüssigkeitsaufnahme war bei Einwirkung von Wasser und 4 % NaCl gleich, bei 20 % NaCl deutlich geringer. Anschließende FTW-Beanspruchung der Würfel in den gleichen Lösungen ergab sehr schnell das gleiche Schadensbild wie die Hauptversuche nach größerer Zyklenzahl. Nach 13 Zyklen wurden die beiden mit Salz beanspruchten Proben dem Sprühtest unterzogen; dabei wurde festgestellt, daß der in 20%iger Lösung gelagerte Würfel vollständig und der in 4%iger Lösung bis auf einen Kern von ca. 3 cm Durchmesser von Chlorid durchdrungen war. Obwohl es sich hier nur um Einzelversuche handelte, kann gefolgert werden, daß bei Vakuumtränkung trockener Betone die Tausalzlösung auch nur bis zu einer bestimmten Tiefe eindringt, während die Frosteinwirkung auf die in ständigem Kontakt mit Salzlösungen stehenden Proben die Chloridpenetration erheblich verstärkt.

### 3.2.2 Frosttauwechsel bei einseitiger Tausalzbeanspruchung

In der Praxis wirken Tausalze bzw. Salzlösungen vorwiegend nur von einer Seite auf Betonbauteile ein. Um die dabei auftretenden Gefrier- und Schmelzvorgänge während einer Frosttauwechselbeanspruchung zu untersuchen, wurden Temperaturmessungen in Betonproben unter entsprechenden Bedingungen vorgenommen.

Der Beton für die prismatischen Probekörper von 10 cm Höhe und einer Grundfläche von 10 cm x 15 cm enthielt je Kubikmeter 335 kg Zement PZ 35 F, 200 l Wasser ( $w/z = 0,60$ ) und rd. 1740 kg Zuschlag der Sieblinie B<sub>8</sub>. Die Würfeldruckfestigkeit nach 28 d betrug im Mittel 34,4 N/mm<sup>2</sup>. In die Prismen wurden je 2 Thermoelemente einbetoniert, deren Lötperlen sich ca. 5 mm bzw. ca. 50 mm unter der Oberfläche befanden. Nach der Herstellung und dem Entformen lagerten die Probekörper 45 d unter Wasser. Anschließend wurden 2 Prismen rd. 8 Wochen bei 50 °C im Vakuumwärmeschrank getrocknet. Aus der dabei erfolgten Abgabe ungebundenen Wassers von 189 bzw. 190 g errechnet sich ein Porenraumanteil von 12,6 Vol.-%. Um eine Feuchtigkeitsresorption zu verhindern, wurde die Oberfläche dieser Proben vollständig mit Epoxidharz abgedichtet. Die übrigen Proben trockneten nach der 45tägigen Erhärtung nur oberflächlich ab, um ebenfalls einen Epoxidharzanstrich aufbringen zu können, wobei hier jedoch an der Oberseite der Prismen eine Fläche von 100 cm<sup>2</sup> unbehandelt blieb. Nach dem Erhärten des Anstrichs lagerten diese Proben weiterhin unter Wasser. Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurde ein Messingrahmen, der die anstrichfreie Fläche umschloß, mit Siliconkautschuk aufgeklebt.

In der ersten Versuchsreihe wurde der Messingrahmen mit jeweils 100 ml Wasser bzw. 4%iger NaCl- und Mischsalzlösung gefüllt, bevor die Proben den Frosttauwechseln zwischen +20 °C und -20 °C unterzogen wurden. Die Abkühlgeschwindigkeit betrug im Bereich des 0°C-Durchgangs und der Eisbildung rd. 8 K/h. Nach insgesamt 16stündiger Abkühl- und Frostperiode wurde die Umgebungstemperatur innerhalb einer Stunde auf +20 °C angehoben. Die Temperaturanstiegsrate im trockenen bzw. wasserbeaufschlagten Beton betrug dabei rd. 30 K/h. Die Gesamtdauer jedes Zyklus lag bei 24 h.

Mittels der einbetonierten Thermoelemente ließen sich die Temperaturen innerhalb der Proben fortlaufend registrieren; zusätzlich wurden die Umgebungstemperatur sowie die der aufstehenden Lösungen aufgenommen. Bei der Eisbildung in den wassergesättigten Betonen blieb infolge des Freisetzens der Kristallisationswärme der Abkühlvorgang hier

gegenüber dem getrockneten Beton merklich zurück. Umgekehrt stieg beim Erwärmen die Temperatur in den eishaltigen Proben gegenüber der trockenen langsamer an, da die Schmelzwärme einen Teil der zugeführten Wärmemenge in Anspruch nahm. Um diese exothermen bzw. endothermen Effekte deutlicher zu erfassen, wurden ähnlich wie bei der Differentialthermoanalyse die Temperaturdifferenzen zwischen den lösungsbeaufschlagten und den trockenen, d.h. eisfreien Proben durch entsprechende Schaltung der Thermoelemente mit einem zweiten Schreiber direkt aufgezeichnet. In Bild 36 sind als Beispiele die Differenzkurven, die beim Abkühlen während des 10. Zyklus im Kern der Proben und unter der Oberfläche gemessen worden waren, über der Zeit aufgetragen. Die Meßkurven der anderen 19 Zyklen dieser Versuchsreihe hatten ein ähnliches Aussehen.

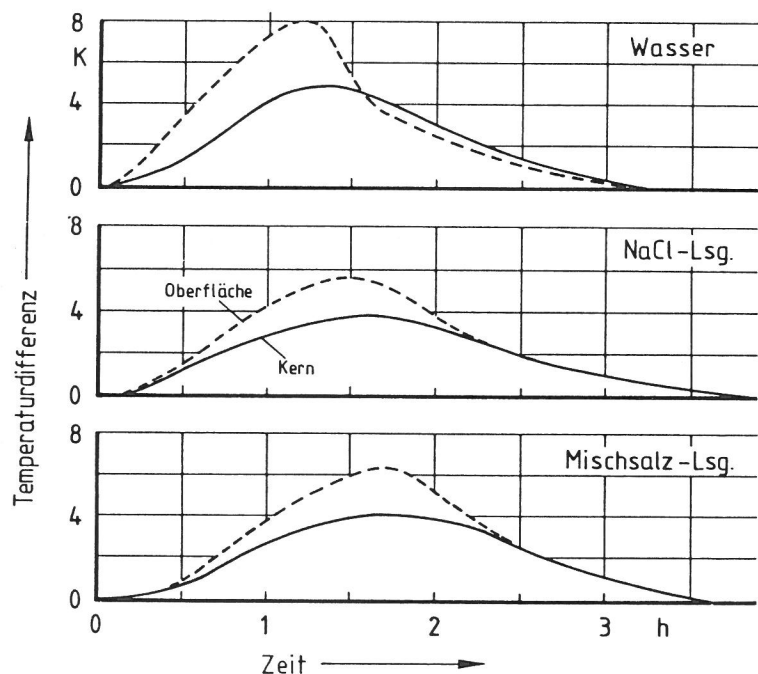


Bild 36  
Exotherme Effekte im Beton beim Gefrieren mit aufstehenden Lösungen

Die hiermit meßbare Eisbildung, die durch den Anstieg der Kurven gekennzeichnet ist, erstreckt sich über einen Zeitraum von 1,5...2 h. Danach nähert sich der Temperaturverlauf dem des Vergleichskörpers wieder an. Bei den salzbeanspruchten Proben setzt die Eisbildung infolge der Gefrierpunktserniedrigung später ein als bei der wasserbeaufschlagten. Stärkere Unterkühlung mit anschließender spontaner Eisbildung, wie sie in anderen Untersuchungen festgestellt worden war, tritt hier nicht auf. Im Bereich unter der Oberfläche werden stets größere Temperatureffekte

te gemessen, die sowohl auf stärkere Eisbildung als auch auf die thermischen Einflüsse, die vom Gefrieren der darüber stehenden Lösungen ausgehen, zurückzuführen sind. Bild 37 zeigt die Differenzkurven, die in demselben Zyklus

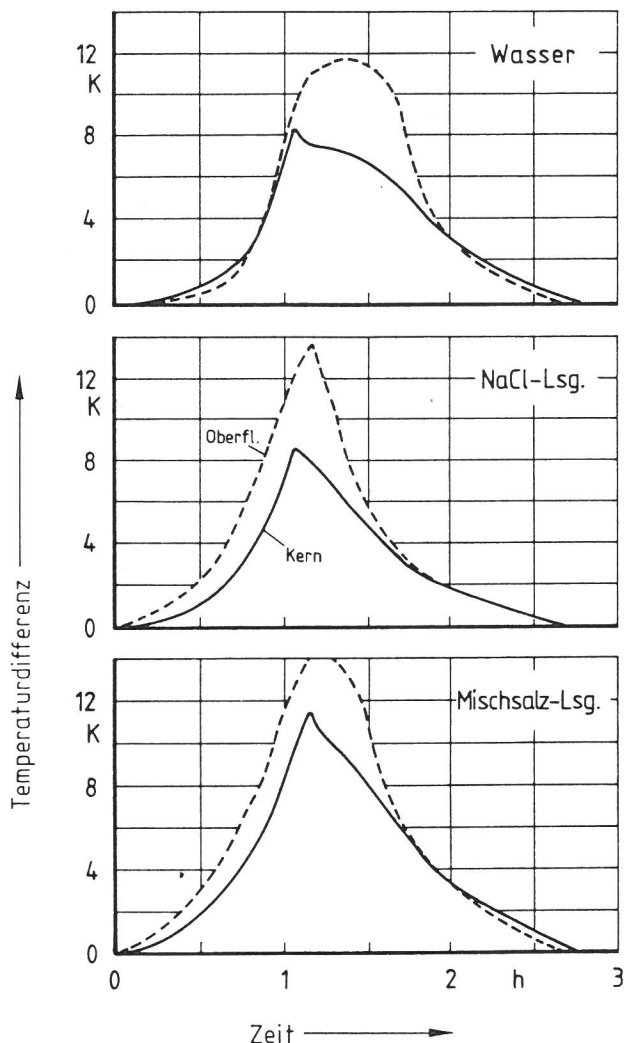


Bild 37  
Endotherme Effekte im Beton infolge Schmelzens  
des Eises bei aufstehenden Lösungen (bzw. Eis-  
schicht)

beim Erwärmen aufgenommen worden waren. Wegen der höheren Temperaturänderungsrate stellen sich hier die thermischen Effekte grundsätzlich ausgeprägter dar; hinzu kommt die Schmelzwärme für die Eismengen, die zusätzlich im weiteren Verlaufe der Frostperiode gebildet worden waren. Die endothermen Vorgänge werden vor allem durch den ersten Teil der Differenzkurven bis zum Maximum angezeigt, während danach wiederum die aufstehenden Lösungen den Verlauf beeinflussen. Trotz dieser Einschränkung läßt sich erkennen, daß für den Auftauprozess eines von Mischsalz beaufschlagten Betons eine erheblich größere Wärmemenge als bei dem von NaCl beanspruchten erforderlich ist. Die Quantifizierung dieser Aussage, die durch Vermessen der

Flächen unter den Differenzkurven versucht worden war, erwies sich jedoch als nicht möglich, da die Ergebnisse unsystematisch streuten.

In der zweiten Versuchsserie sollte der Temperaturverlauf ermittelt werden, der sich beim Aufstreuen von Salzen bei mäßigem Frost ergibt. Hierzu dienten die gleichen wasser-gesättigten Proben wie in der ersten Serie, wobei der Aufsatzrahmen jeweils 100 ml Wasser enthielt. Nachdem die Proben rd. 20 h bei einer Temperatur von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  lagerten, wurden 4 g NaCl bzw. Mischsalz auf die Eisoberfläche auf-gestreut. Nach Abklingen der dabei eintretenden thermi-schen Effekte wurde die Temperatur von  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wie oben beschrieben, angehoben. Die im Aufsatz gebildete 4%ige Salzlösung wurde vor Beginn des nächsten Zyklus ab-gegossen und durch Wasser ersetzt. Die Versuchsserie um-faßte 10 Zyklen.

Infolge der Vorgänge an der Betonoberfläche während dieser Beanspruchung, insbesondere des partiellen Eindringens der Salzlösungen in den Beton, und wegen der versuchstech-nischen Schierigkeit, das Salz gleichmäßig auf die Eis-schicht aufzubringen, ohne dabei die Umgebungstemperatur zu beeinflussen, variierten die Temperaturaufzeichnungen von Zyklus zu Zyklus. Bild 38 zeigt den Verlauf der Dif-ferenzkurven im 1. und 5. Streugang als Beispiele. Im

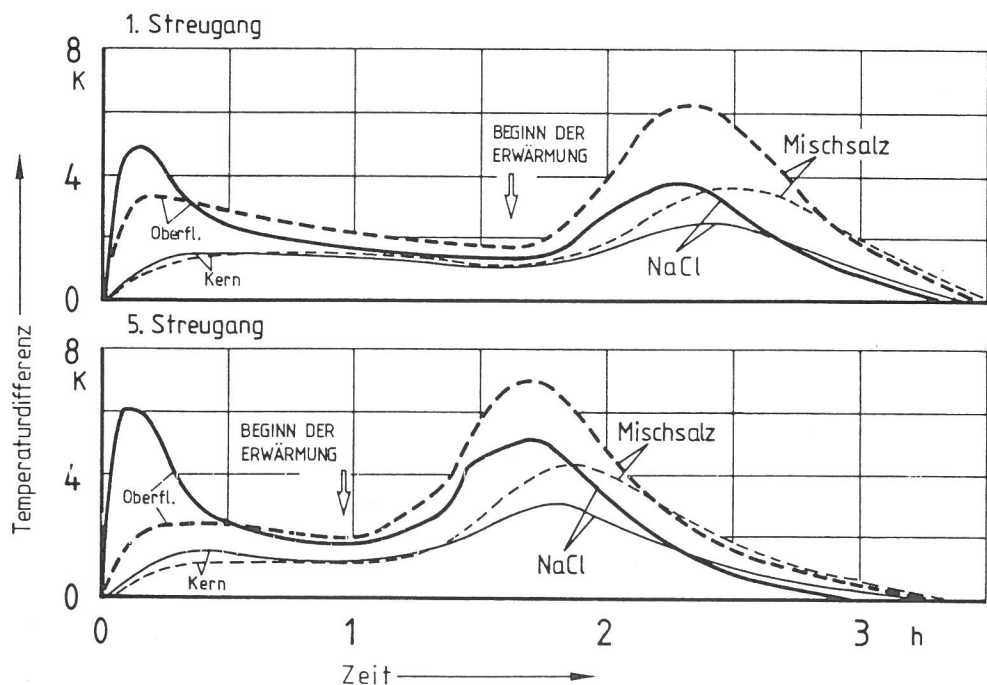


Bild 38  
Endotherme Effekte im Beton  
mit aufstehender Eisschicht  
beim Aufstreuen von Salz  
bei  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  und anschließendem  
Erwärmen

ersten Zeitabschnitt ist die Umgebungstemperatur konstant auf  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  gehalten worden. Durch das Aufstreuen der Salze setzt gleichzeitig der Schmelzvorgang ein, da bei dieser Temperatur die Liquiduslinie des Systems Wasser - Salz überschritten wird. Dabei wird der Umgebung die Schmelzwärme entzogen, was zu plötzlicher Unterkühlung führt. Dieser sogenannte Temperaturschock ist beim NaCl stets ausgeprägter als beim Mischsalz. Während die Betonoberfläche bei NaCl-Streuung von  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  kurzfristig auf  $-7\ldots-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  abkühlt, bewirkt die Mischsalzstreuung eine Temperaturabsenkung nur auf  $-4\ldots-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hinsichtlich der Höhe dieser Effekte ist allerdings zu berücksichtigen, daß Eis- und Salzmengen hier weit über den in der Praxis anzutreffenden lagen. Auf den Kern der Betonproben wirkt sich der Temperaturschock nur in geringem Maße aus. Beim anschließenden Erwärmen werden zum vollständigen Aufschmelzen der 1 cm dicken Eisschicht bei Anwesenheit von Mischsalz wiederum höhere Wärmemengen benötigt als beim NaCl.

In beiden Versuchsserien waren im Verlaufe der Frosttauwechsel Aufquellungen und Absandungen an den salzbeanspruchten Oberflächen festzustellen, die bei NaCl wesentlich stärker waren als beim Mischsalz. Eine Röntgenbeugungsanalyse des von der Oberfläche abgelösten Materials zeigte, daß dieses im Vergleich zu der darunter liegenden festen Schicht erheblich mehr Calciumcarbonat, aber weniger Friedelsches Salz (Calciumchloroaluminat) und kein Calciumhydroxid enthielt. Ferner fanden sich NaCl-Ausscheidungen. Hierin bestätigt sich der kalklösende Einfluß der Chloride, wobei anscheinend die Carbonatisierung gefördert und in deren Folge die Bindung des Chlorids im Friedelschen Salz gemindert wird.

### 3.3 Freibewitterung von Betonplatten

#### 3.3.1 Versuchsdurchführung

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.2 beschriebenen zyklischen Frostbeanspruchungen im Labor sollten auf weitere Probekörper die natürlichen Witterungsbedingungen einwirken. Dazu dienten industriell gefertigte, bewehrte Betonplatten 40 cm x 40 cm x 8 cm in drei unterschiedli-

chen Qualitäten, deren betontechnologische Daten in Abschnitt 3.4.1 ausführlich angegeben sind. Die Platten erhielten einen Aufsatzrahmen aus 4 cm breiten PVC-Streifen, die senkrecht in am Rand der Plattenoberseite eingefräste Nuten mit Epoxidharz eingeklebt wurden. Auf einem Stahlrohrgestell aufliegend wurden die Proben mit einem Neigungswinkel von ca.  $2,5^\circ$ , etwa in südlicher Richtung geneigt, auf dem Dach des Gebäudes Nr. 20 der BAM der Witterung ausgesetzt. Die Neigung sollte unterschiedliche Höhen des Regenwassers bzw. Eises innerhalb der Aufsatzrahmen bewirken, die demzufolge bei maximaler Füllung bei etwa 2...4 cm lagen. Nach mehrtätigen niederschlagsfreien Witterungsabschnitten begannen die Plattenoberseiten vom oberen Rand her abzutrocknen. Insgesamt kann gesagt werden, daß die Platten an der Oberfläche jeweils zur Hälfte überwiegend feucht bzw. häufig trocken waren. Während der dreijährigen Exposition mußten die Proben mehrfach von dem aus der Luft sich ablagernden Schmutz befreit werden. Ebenso wurden die Platten in jedem Winter einmal bei zwischenzeitlich einsetzender Tauwetterperiode gereinigt.

Bei winterlicher Witterung wurden die Platten bis zu dreimal täglich mit NaCl bzw. Mischsalz bestreut. Die Streumenge betrug einheitlich  $40 \text{ g/m}^2$  je Streugang, entsprechend dem damals in Berlin gültigen Höchstwert. In den drei Winterperioden zusammen wurden 214 Streugänge an 88 Tagen durchgeführt, die Gesamtmenge an Salz betrug  $1.370 \text{ g}$  je Platte oder rd.  $8,5 \text{ kg/m}^2$ . Zum Vergleich sei angemerkt, daß die Streumenge im Winter 1978/79 auf den Bundesautobahnen durchschnittlich  $2,6 \text{ kg/m}^2$  betrug und somit die gleiche Größenordnung vorliegt. Tabelle 4 gibt die Verteilung der Streuungen auf die einzelnen Jahre wieder. Abweichungen von den entsprechenden Daten der Berliner Stadtreinigungsbetriebe ergeben sich einerseits aus den innerhalb der Aufsatzrahmen sich häufiger bildenden Eisschichten, andererseits aus fehlenden Streugängen an Wochenenden und Feiertagen. Dennoch dürfte die Beanspruchung insgesamt als praxisgerecht angesehen werden.



Zeitraum der Streuungen	Anzahl d. Streutage	Anzahl d. Streuungen	Gesamtmenge (kg/m <sup>2</sup> )
1. Winter: 13.01.81 - 02.03.81	23	65	2,60
2. Winter: 10.11.81 - 25.02.82	40	101	4,04
3. Winter: 02.12.82 - 25.02.83	25	48	1,92
Summe:	88	214	8,56

Tabelle 4  
Angaben zu den Salzstreuungen bei den Freiwitterungsversuchen auf dem Dach von Haus 20 der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)

Für die Beanspruchung mit beiden Salzarten sowie einen salzfreien Vergleichsversuch standen jeweils 2 Platten von jeder der drei Betonqualitäten zur Verfügung, insgesamt 18 Platten. Die Proben wurden nach der Art der Bestreuung mit N 1...N 6 (NaCl) bzw. M 1...M 6 (Mischsalz), die Nullproben mit 0 1...0 6 bezeichnet, wobei die Nr. 1 und 2 der Betonqualität I, Nr. 3 und 4 der Qualität II und Nr. 5 und 6 der Qualität III entsprachen. Die Stahlrohrgestelle, die die zu bestreuenden Proben trugen, standen in Kunststoffwannen, die eventuelle ablaufende Salzlösung aufzufangen vermochte.

Die Erfahrungen mit der Versuchsdurchführung während des ersten Jahres führten u. a. dazu, anstelle der ursprünglich vorgesehenen elektronischen Registrierung der Klimadaten einen mechanischen Temperaturschreiber unmittelbar neben den Platten aufzustellen. Seit dem Jahresbeginn 1982 erfolgte eine ununterbrochene Registrierung der Lufttemperatur. Hieraus konnten im Winter 1982 bis Mitte April 28 Tage ermittelt werden, an denen der für Zerstörungsvorgänge meist verantwortlich gemachte Frosttauwechsel stattfand. Für den darauffolgenden Winter betrug die Zahl 50. Hierbei traten jedoch nur geringe Temperaturänderungsgeschwindigkeiten auf, da sich die Werte vorwiegend in einer engen Spanne von wenigen Kelvin (nur vereinzelt bis zu 7 K) bewegten. Eisbildungen und Auftauvorgänge auf und in den Betonproben können nur bedingt mit den in der Umgebungsluft festgestellten Frosttauwechseln in Zusammenhang

gebracht werden. Vielmehr düften die vorherrschend auftretenden mehrtägigen, im Januar 1982 sogar mehrwöchigen Frostperioden die entscheidenden Bedingungen für das Gefrieren des Wassers im Porenraum der Betone darstellen. Schroffe Temperaturwechsel fanden dagegen nur im Sommer statt. Die Erwärmungsraten betrugen bis zu 2,5 K/h bei maximalen Temperaturanstiegshöhen von 20 K.

### 3.3.2 Untersuchungsergebnisse

Während der dreijährigen Auslagerung konnten nur augenscheinliche Prüfungen erfolgen. Nach dem ersten Winter war vor allem an den salzfreien Proben ein Abwittern der "Zementhaut" festzustellen. An den übrigen, aufgrund der Salzstreuungen weniger durch Eisbildung belasteten Plattenoberseiten zeigten sich dagegen nur zahlreiche Haarrisse. Aber auch erste Rostflecke traten hier an den Oberflächen schon auf.

Im Verlauf einer längeranhaltenden Frostperiode durchfeuchteten die salzbehandelten Platten im Eckenbereich. Infolge der Salzstreuung war das Eis aufgetaut und die entstehende Lösung in den Beton eingedrungen. Im nachfolgenden Sommer zeigten sich durch Kalk- und später auch Rostausscheidungen Haarrisse an den Seitenflächen unweit der Ecken, die vermutlich schon im Winter entstanden waren und zur Durchfeuchtung beigetragen hatten. Diese Risse traten auch bei den salzfreien Vergleichsproben auf, jedoch ohne jegliche Kalk- und Rostausscheidungen bis zum Abschluß der Versuche. Bei den salzbelasteten Platten verstärkten sich dagegen diese Effekte von Jahr zu Jahr. Hinzu kam eine zunehmende Abwitterung der Seitenflächen je nach Betonqualität. Bild 39 zeigt eine Platte der Qualität III in der Seitenansicht nach dreijähriger Freibewitterung. Man erkennt deutlich die weißen Kalkausscheidungen an dem linken Rißsystem und die Rostflecken an dem rechten. Bild 40 zeigt beide Ausscheidungsformen an den gleichartigen Rissen einer Platte derselben Qualitätsgruppe. Die Seitenflächen der Proben der Betonqualität I dagegen lassen auch in der Umgebung der Risse noch die ursprüngliche glatte Oberfläche erkennen (Bild 41 und 42).

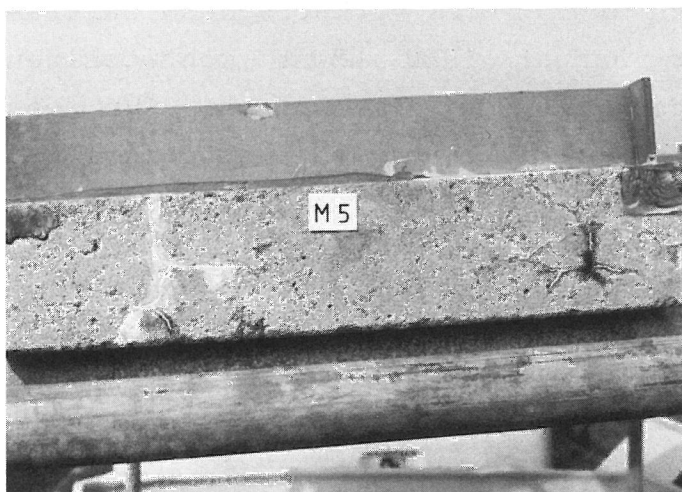


Bild 39  
Seitenansicht der Platte M 5 (Betonqual. III) auf dem BAM-Ver-  
suchsstand nach der 3. Winterperiode



Bild 40  
Kalksinter und Rostausscheidungen an der Seitenfläche der  
Platte N 5 (Betonqual. III)

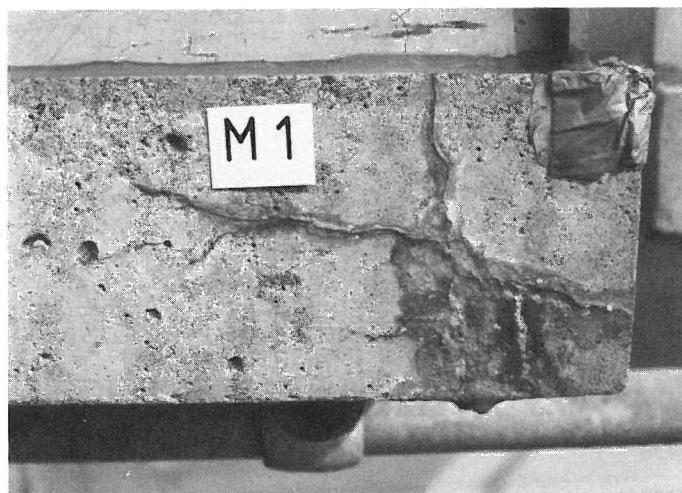


Bild 41  
Kalksinter und Rostausscheidungen an der Seitenfläche der  
Platte M 1 (Betonqual. I)



Bild 42  
Kalksinter und Rostausscheidungen an der Seitenfläche der  
Platte N 2 (Betonqual. I)

Zu den Ursachen der Korrosion im Eckenbereich wird noch  
Stellung genommen.

Die bestreuten Oberflächen wiesen im Verlauf der weiteren  
Winterperioden nur geringe Erhöhungen der Abwitterung auf.  
Im wesentlichen beschränkte sich diese auf dünne Zement-  
steinlagen auf größeren, dicht unter der Oberfläche lie-  
genden Zuschlagkörnern. Nur die Platte N 6 witterte im  
"häufig abtrocknenden" Bereich großflächig um mehrere  
Millimeter ab, was aber in der Gesamtbetrachtung nicht als  
typisch angesehen werden kann. An der Plattenunterseite  
waren mit abnehmender Betonqualität an allen Proben zuneh-  
mend deutliche Auswaschungen durch Kondenswasser zu beob-  
achten. Ferner ließen die salzbelasteten Platten mit der  
Zeit zunehmend erkennen, daß sie während trockener Witte-  
rungsperioden die Feuchtigkeit sehr viel langsamer abgaben  
als die Vergleichsproben.

Im äußeren Erscheinungsbild war kein signifikanter Unterschied in der Wirkung der beiden Salzarten ersichtlich. Lediglich beim Aufstreuen der Salze auf eine Schnee- oder Eisschicht wurde das unterschiedliche Verhalten deutlich, indem die NaCl-Körner rasch, die CaCl<sub>2</sub>-Schuppen jedoch nur sehr langsam in Lösung gingen.

Nach Ablauf der Freibewitterung wurden aus den Platten "O 1", "N 1" bis "N 6" und "M 1" bis "M 6" Bohrmehlproben für die Chloridgehaltsbestimmung entnommen. Mit einem stumpfwinkligen Hartmetallbohrer 25 mm  $\varnothing$  wurde das Material in 1-cm-Stufen abgetragen. Beim Erreichen der Bohrtiefe von 6 cm brach die noch verbleibende 2 cm dicke Schicht an der Unterseite kegelförmig aus, so daß hier keine Proben mehr zur Verfügung standen. Je 2 Bohrlöcher lagen im "feuchten" (Bezeichnung A) und im "häufig trockenen" Bereich (Bezeichnung B) der Platten etwa 150 mm von den Seitenkanten und 80 mm von der vorderen bzw. hinteren Kante entfernt. Diese Lage wurde gewählt, um spezielle Einflüsse der Ecken mit ihren Rissen auszuschließen. Das Material aus beiden Bohrungen im jeweiligen Bereich A und B wurde je Tiefenlage zu einer Probe zusammengefaßt, so daß insgesamt aus jeder Platte 2 x 6 Bohrmehlproben von rd. 20 g zur Verfügung standen. Anschließend wurden mittels Naßbohrung aus jeder Platte 2 Bohrkerne 50 mm  $\varnothing$  entnommen. Die Bohrungen lagen etwa 80 mm von den Seitenkanten und 160 mm von der vorderen bzw. hinteren Kante entfernt. Diese Position sollte ebenso wie die der Bohrmehlentnahmen möglichst verhindern, beim Bohren auf Bewehrungsstahl zu stoßen, was nicht in allen Fällen gelang. Nach der Wassersättigung der Bohrkerne wurden das Volumen durch Tauchwägung und die Masse bestimmt und nach Trocknung bei 105 °C der Masseverlust ermittelt. Aus der volumenbezogenen Wasserabgabe der Proben ließ sich ein Porositätswert errechnen, der mit der üblicherweise durch Wasseraufnahme getrockneter Proben unter Atmosphärendruck bestimmten offenen Porosität praktisch gleichzusetzen ist. Die ebenfalls ermittelten Rohdichtewerte waren nicht aussagekräftig, da sie infolge untypischer Zuschlag- oder Bindemittelanreicherungen oder Bewehrungseinschlusses in weiten Grenzen unsystematisch schwankten.

Den Bohrmehl- und Bohrkernentnahmen schloß sich die völlige Freilegung der Bewehrung an, die auf Korrosionserscheinungen geprüft wurde (s. a. Abschn. 4). Betonbruchstücke aus den durch Kalk- und Rostausscheidungen geprägten Bereichen wurden für rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen sichergestellt.

In Tabelle 5 sind die Einzel- und Mittelwerte der Porositätsbestimmung aufgeführt. Sie stimmen im Rahmen der Fehlergrenze mit den an den gleichen Platten der Feldversuche

		Beanspruchung					
		salzfrei		NaCl		Mischsalz	
Beton-qual.	Platte Nr.	Porosität in %					
		Einzel- werte	Mittel- wert	Einzel- werte	Mittel- wert	Einzel- werte	Mittel- wert
I	1	13,9 13,5	13,7	13,7 13,5	13,6	13,2 13,2	13,4
	2	- -		13,4 13,8		13,7 13,5	
II	3	- -	-	13,9 13,7	13,7	14,5* 16,8*	14,5
	4	- -		13,4 13,9		13,4 13,3	
III	5	- -	-	14,8 14,7	14,8	15,5 15,0	15,0
	6	- -		14,9 14,7		14,8 14,7	

Tabelle 5  
Porosität der Betonplatten, ermittelt an 50-mm-Bohrkernen nach Abschluß der Freibewitterung

\* die Werte der Platte M 3 entsprechen etwa denen für M 5 und M 6

gefundenen Werte (s. 3.4.2) überein. Die Platten Nr. 5 und 6 weisen eine deutlich höhere offene Porosität als Nr. 1 und 2 (Qualität I) und Nr. 3 und 4 (Qualität II) auf, die sich ihrerseits nur geringfügig voneinander unterscheiden, mit Ausnahme der Platte M 3, die wohl der Qualität III zugeordnet werden müßte. Ähnlich verhält es sich mit der Verteilung der Chloridgehalte. Die Werte sind als Mittel aus je 2 Einzelbestimmungen in Bild 43 für NaCl bzw. in Bild 44 für Mischsalz dargestellt. Die Verteilung in den Platten der Qualität I und II folgt annähernd der aus den Zylinderversuchen bekannten und zu erwartenden Diffusionskurven. Allerdings lassen die Proben der Qualität II in der 6. Schicht tendenziell eine leichte Zunahme des

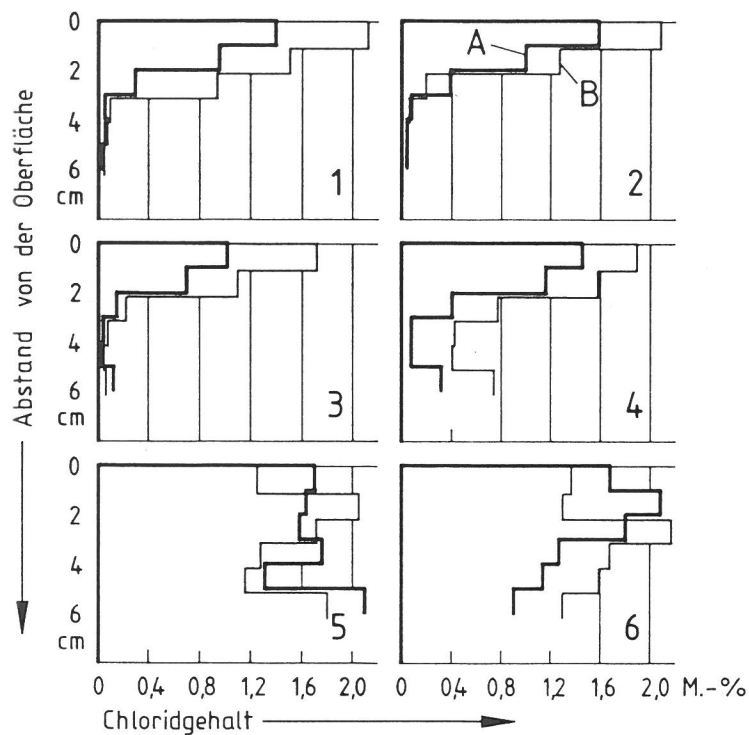


Bild 43  
Chloridgehalte (bez. auf Zementanteil) der mit NaCl bestreuten Betonplatten Nr. 1 - 6 in Abhängigkeit von der Tiefenlage; A = „feuchter“ Bereich, B = „trockener“ Bereich

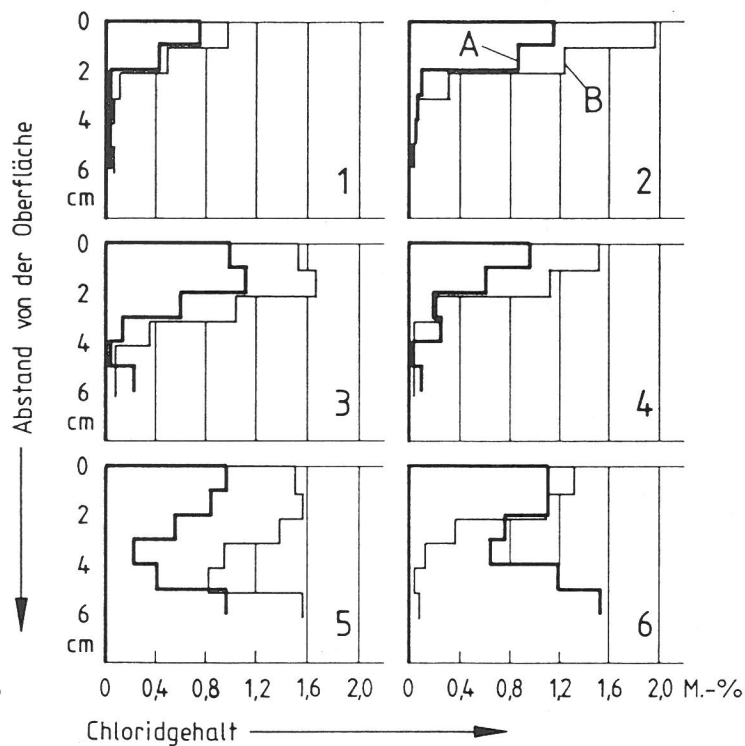


Bild 44  
Chloridgehalte (bez. auf Zementanteil) der mit Mischsalz bestreuten Betonplatten Nr. 1 - 6 in Abhängigkeit von der Tiefenlage; A = „feuchter“ Bereich, B = „trockener“ Bereich

Chloridgehaltes zur Unterseite hin erkennen, die bei der Qualität III ausgeprägt ist. Hier sind auch insgesamt die Werte bedeutend höher. Ferner fallen die vorwiegend höheren Chloridgehalte im Bereich "B" auf, der häufiger abtrocknete als der meist feuchte Bereich "A". Daraus kann zunächst nur die allgemeine Schlußfolgerung gezogen werden, daß Feuchtigkeitstransportvorgänge zu freien Oberflächen die Chloridverteilung maßgeblich beeinflussen können, wobei die durch Zementgehalt und Porosität gegebenen Strukturparameter entscheidend mitwirken.

Zur Bewehrungskorrosion wird in Abschnitt 4 eingehend Stellung genommen. Zur Veranschaulichung des Gesamtzustandes der Platten sollen jedoch schon an dieser Stelle drei der freigelegten Bewehrungskörbe als Beispiele gezeigt werden. Bild 45 zeigt die Bewehrung - Betonstahl glatt BSt 22/34 - der nichtbestreuten Platte "0 1", die noch keine Anzeichen einer Korrosion aufweist (eine der Diagonalstreben wurde bei der Bohrkernentnahme abgeschnitten).

Hier wurden zwei der Kunststoff-Abstandshalter an der ursprünglichen Stelle belassen, die vereinzelt aber auch an anderen Bereichen angebracht waren. Die in den Bildern



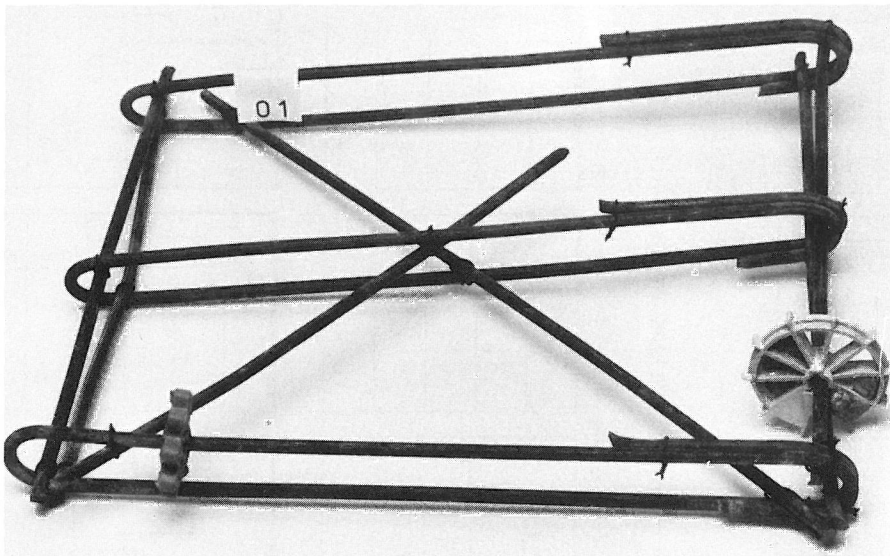


Bild 45  
Bewehrung der Platte 0 1 nach drei-  
jähriger Freibewitterung

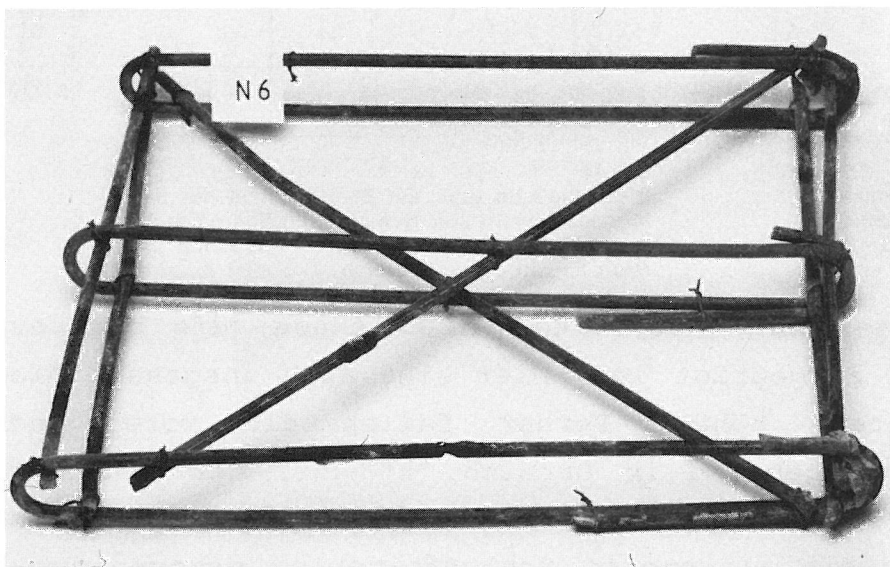


Bild 46  
Bewehrung der Platte M 6 nach drei-  
jähriger Freibewitterung mit Misch-  
salzbelastung

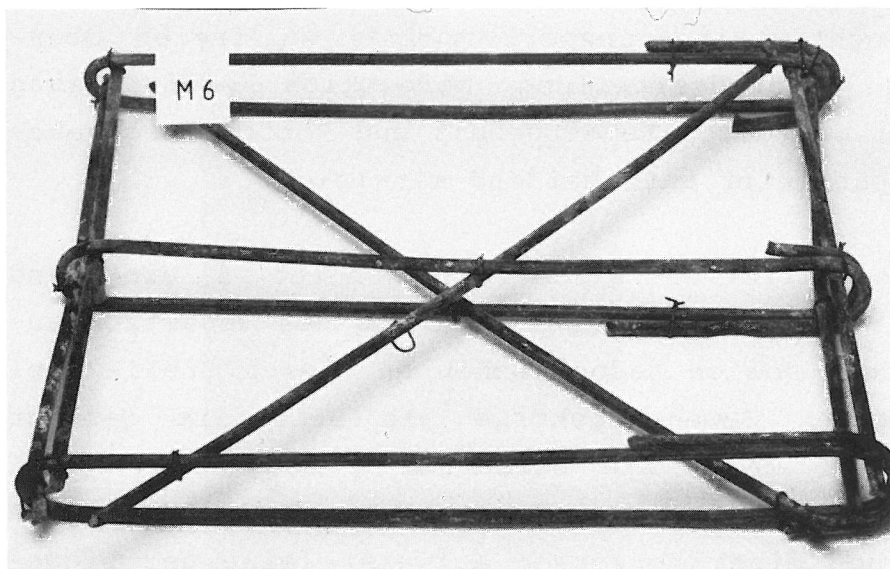


Bild 47  
Bewehrung der Platte N 6 nach drei-  
jähriger Freibewitterung mit Na-  
triumchloridbelastung

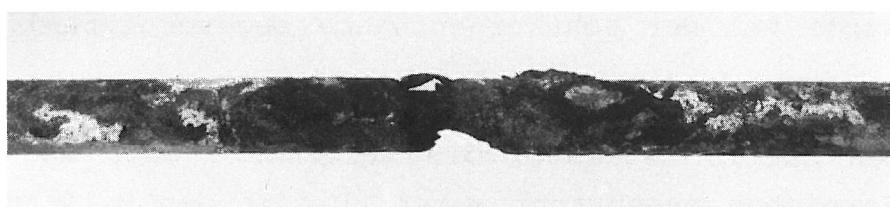


Bild 48  
Ausschnitt aus der Bewehrung in Bild  
47; Korrosion unter einem Ab-  
standshalter



39 bis 42 dargestellten Risse im Beton nahe den Ecken der Platten konnten vielfach mit der Lage dieser Abstandshalter in Verbindung gebracht werden. Die Bewehrungskörbe der Proben "M 6" und "N 6" (Bild 46 und 47), deren Betone sowohl erhöhte Porosität als auch beträchtliche Chloridgehalte aufwiesen, sind partiell stark angerostet. Bild 48 zeigt einen Ausschnitt aus der Bewehrung "N 6" mit weitgehender Durchrostung, die unter einem Abstandshalter gefunden worden war. Diese Bilder sind typisch für alle salzbelasteten Platten, die ähnliches in unterschiedlichem Ausmaß zeigten, wobei die Proben Nr. 1 und 2 jeweils die geringste Anzahl an Rostnarben aufwiesen.

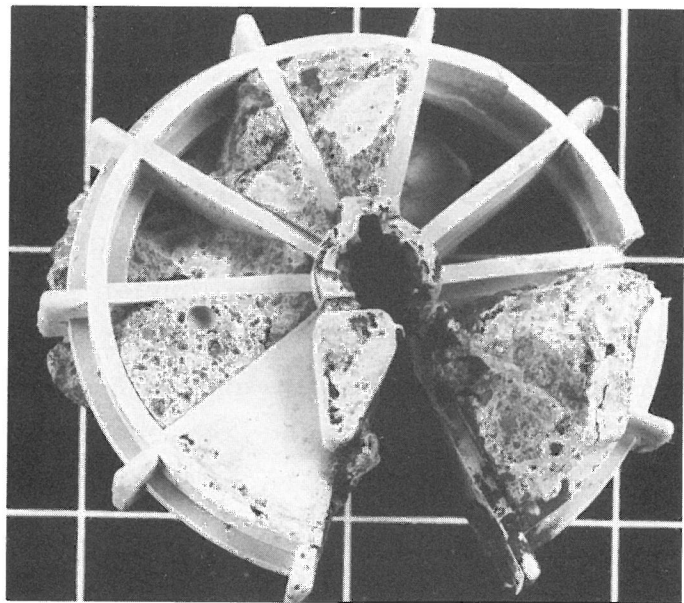


Bild 49  
Abstandshalter 65 mm  $\varnothing$  mit Betonresten und Korrosionsprodukten

Bild 49 zeigt einen der Abstandshalter mit teilweise von Rost überzogenen Betonresten. Der Kunststoffkörper wirkte einerseits im Beton anscheinend gefügestörend und die Haarrißbildung fördernd, zumal er unmittelbar unter der Außenfläche lag. Andererseits verhinderte er die vollständige Umhüllung des Betonstahls mit Zementleim beim Betonieren, weil der Spalt zwischen dem inneren Kunststoffring und dem Stahl zu eng war. In den Beton eindringende Chloridlösungen finden somit unter den Abstandshaltern meist ungeschützten Stahl, so daß hier ein besonderes Gefährdungspotential vorliegt. Die Korrosionsprodukte verteilen sich im Beton in der Umgebung der Roststellen, wie Bild 50 als Beispiel erkennen läßt. Der Abdruck zweier Stähle in der Probe ist deutlich zu erkennen. Teilweise ist er von rostfarbenen Ausscheidungen bedeckt, die sich

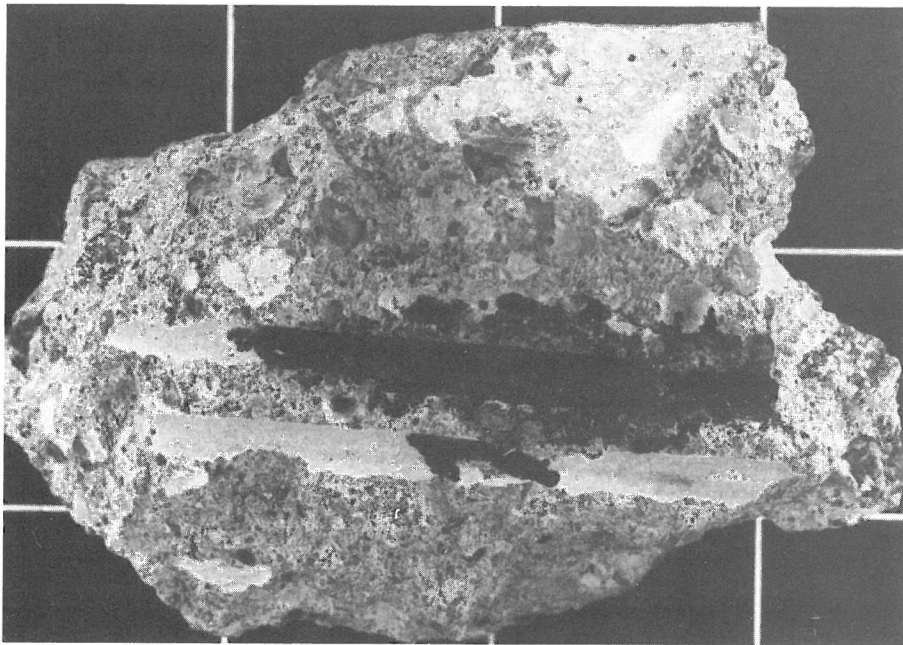


Bild 50  
Betonprobe aus der Platte M 5 mit  
Abdruck des Bewehrungsstahles,  
teilweise durch Rostausscheidung  
verfärbt

auch in der Umgebung noch finden und, wie bereits dargestellt, sich sogar an der Außenflächen der Platten fanden. Unter der Lupe waren hell-, rot- und dunkelbraune und z. T. blauschwarze Ausscheidungen in schlieren- und rosettenähnlicher Form zu erkennen, die bewiesen, daß die Stahlkorrosionsprodukte aus wäßrigen Lösungen in unterschiedlicher Weise ausgeschieden worden waren. Vielfach fanden sich auf den Bruchflächen der Proben gleichzeitig weiße, schlierige Überzüge oder gelblichweiße Rippen, die wahrscheinlich aus amorpher Kieselsäure bzw. aus Calcit als Umwandlungsprodukte der Zementstein-Mineralen bestanden. An kleinen Proben aus den abgeschlagenen Betonstücken wurden umfangreiche rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt, aus denen die folgenden Bilder eine Auswahl typischer Beispiele darstellen (am unteren Bildrand ist jeweils der Abstand zwischen zwei Maßstab-Markierungspunkten in  $\mu\text{m}$  angegeben). Bild 51 zeigt die Seitenfläche einer salzbelasteten Platte. Die Zementsteinmatrix ist abgewittert, die 0,2...0,5 mm großen Zuschlagkörner des Feinmörtels sind freigelegt und haben kaum noch Halt. Die oberflächennahe Betonverwitterung wird deutlich. Die salzfreien Proben wiesen derartige Erscheinungen nicht auf. Bild 52 zeigt rippenförmige Kalkausscheidungen auf einer rostverfärbten Bruchfläche. Bei höherer Vergrößerung (Bild 53) ist die feste Struktur einer der Rippen neben einer feinkristallinen, ebenfalls aus Kalkausscheidungen

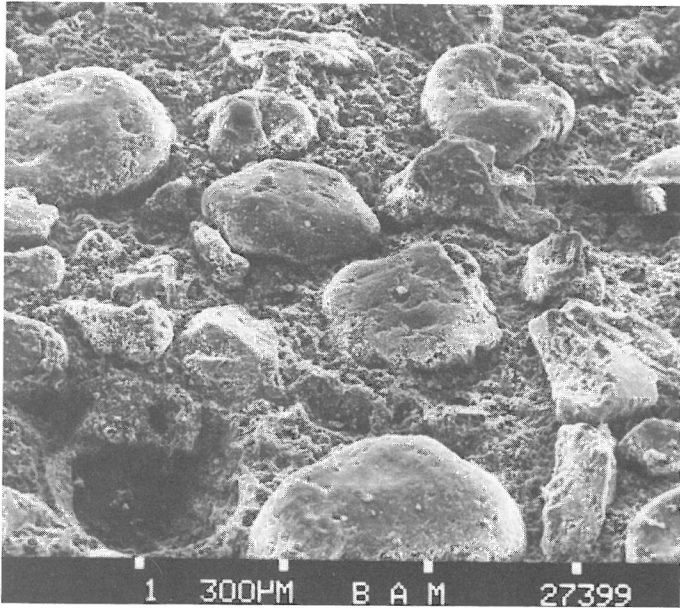


Bild 51  
REM-Aufnahme einer absandenden Seitenfläche der salzbelasteten Betonplatte M 6

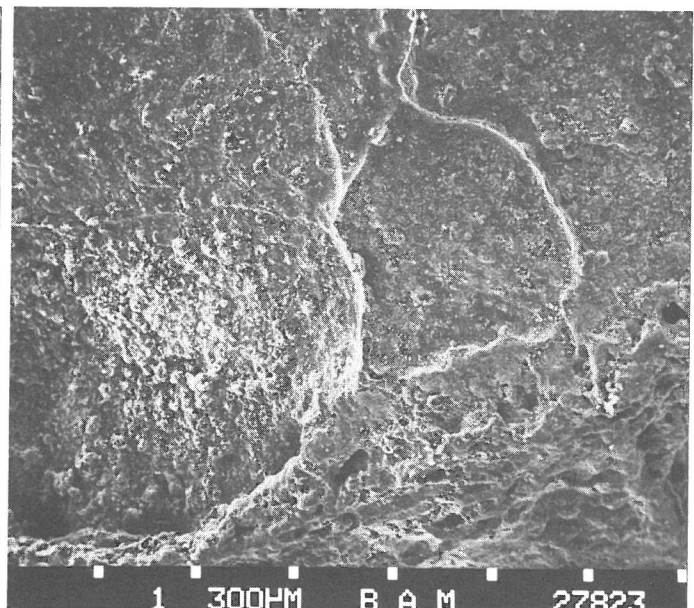


Bild 52  
REM-Aufnahme von Kalkrippen auf Rostausscheidungen im Beton der Platte M 6

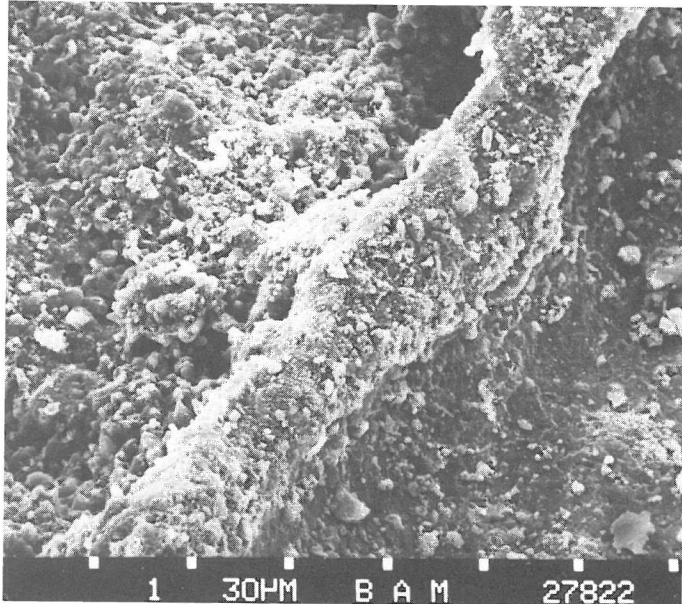


Bild 53  
REM-Aufnahme von rippenförmigen und mikrokristallinen Kalkausscheidungen; Detail der Probe in Bild 52

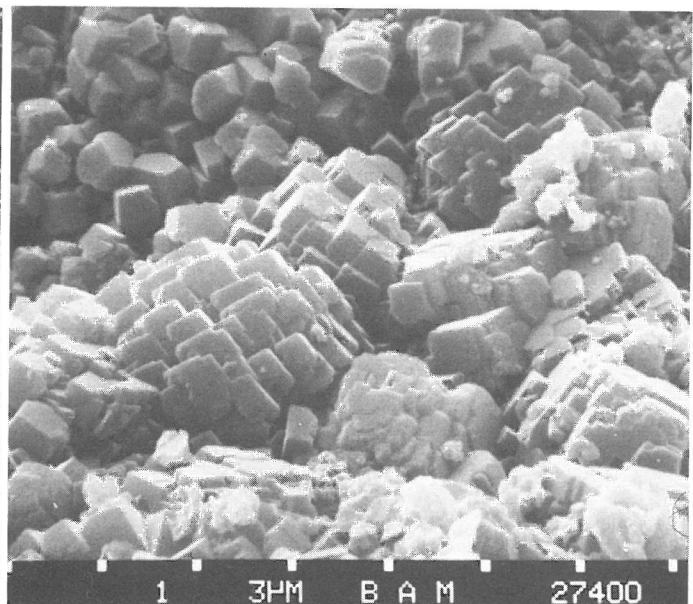


Bild 54  
Calcit-Kristalle als Ausscheidungen im Beton der Platte M 6; REM-Aufnahme

bestehenden in der Umgebung zu erkennen (die Mineralidentifizierung erfolgte mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse im gleichen Gerät). An anderen Stellen wurde der aus dem Zementstein gelöste Kalk in Form verstreuter oder kompakt zusammenhängender Calcitkristalle ausgeschieden (Bild 54). Diese wie auch die vielfach gefundenen Natriumchlorid-Kristalle könnten durch Kristallisationsdruck Gefügestörungen bzw. Spannungen im Beton verursachen. Die NaCl-Kristalle traten in größeren Würfeln oder in nahezu rechteckigen, abgerundeten Tafeln und vor allem in whiskerähnlicher Form unterschiedlicher Größe



auf. Letztere sind in Bild 55 dargestellt. Diese Form wird makroskopisch auch häufig in NaCl-Ausblühungen auf Betonoberflächen gefunden.

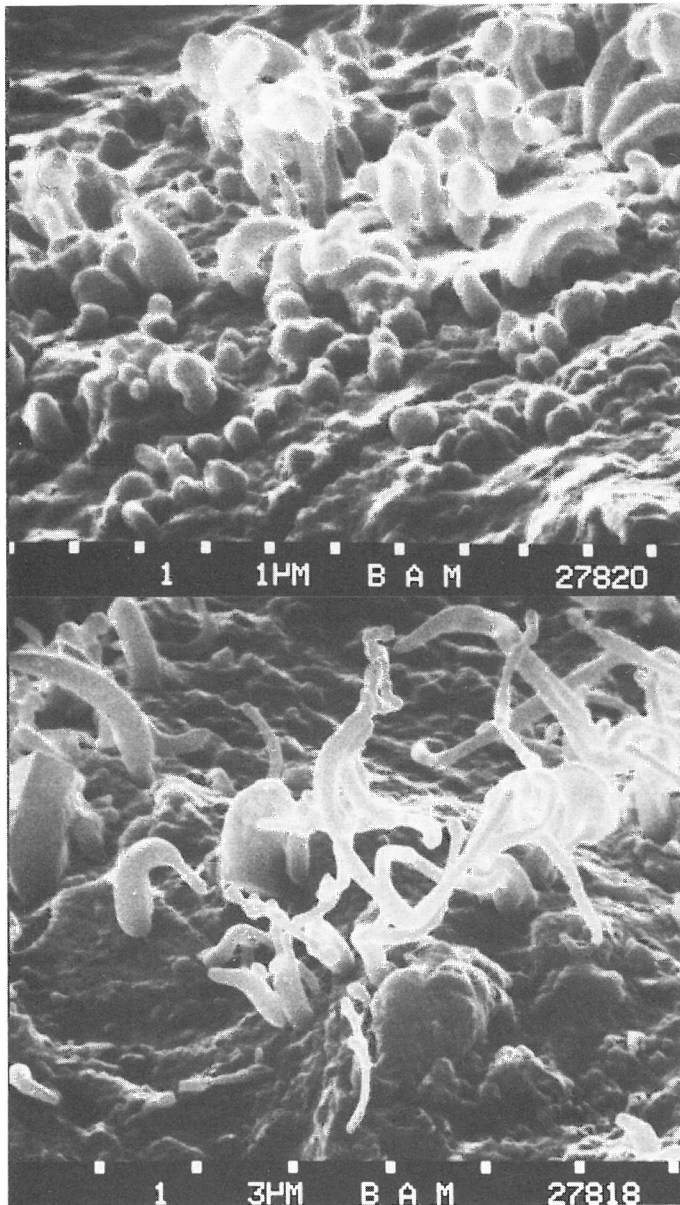


Bild 55  
REM-Aufnahme von Natriumchlorid-Kristallen im Beton der Platte M 6

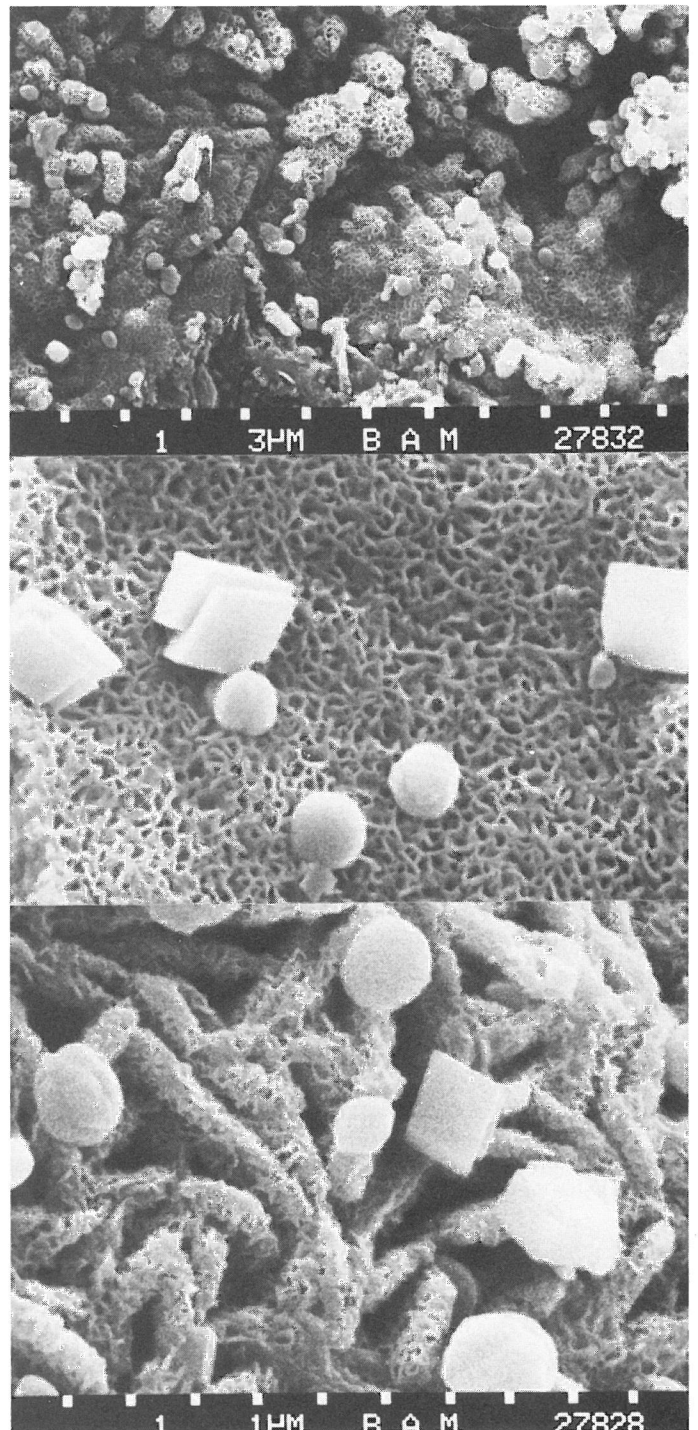


Bild 56  
Verschiedene Formen von Fe-Ausscheidungen gelöster Stahlkorrosionsprodukte im Beton der Platte M 6; REM-Aufnahmen

An rostfarbenen Stellen derselben Betonprobe wurden sehr unterschiedliche eisenhaltige Ausscheidungen, vermutlich alles Eisenoxidhydrate, gefunden (Bild 56). Sie liegen als knollige oder rosettenförmige (im Bild oben), oolithische, spätige oder schwammartige (Bildmitte und unten) Gebilde vor. Die Struktur dürfte großen Einfluß auf die Feuchtig-

keitsadsorption und -desorption haben, die wiederum zusätzliche Gefügespannungen verursachen kann.

### 3.4 Feldversuche an Bordsteinen und Platten

#### 3.4.1 Versuchsdurchführung

Zur vergleichenden Untersuchung der Einwirkung der beiden Tausalzarten auf Stahlbeton unter Bedingungen der Praxis sollten bewehrte Betonproben an Hauptverkehrsstraßen ausgelagert werden. Für diesen Zweck stellte ein Betonwarenerk im September 1980 Bordsteine 150 x 300 x 1000 mm<sup>3</sup> und Gehwegplatten 80 x 400 x 400 mm<sup>3</sup> in je drei unterschiedlichen Betonqualitäten her. In Tabelle 6 sind die Zementgehalte und Wasserzementwerte der Rezepturen angegeben; in der Reihenfolge der Qualitätsbezeichnungen I - III waren abnehmende Zementgehalte bei gleichzeitig zunehmendem

Bez. d. Beton- qualität	Zement- gehalt	w/z	Biegezug-1)   Druck-2) festigkeit nach 28 Tagen	
	M.-%	-	N/mm <sup>2</sup>	
Bordsteine				
I	20,6	0,38	8,5	54,7
II	17,3	0,45	6,6	49,8
III	14,1	0,55	5,3	42,8
Platten				
I	18,9	0,47	8,7	55,4
II	16,3	0,55	6,5	57,9
III	13,5	0,66	5,8	53,8

Tabelle 6  
Zusammensetzung und Festigkeits-  
kennwerte der Betone

1) ermittelt am Probekörper

2) ermittelt an je 4 Bohrkernen 81 mm Ø

Wasserzementwert unter Berücksichtigung der produktions-technischen Randbedingungen gewählt worden. Diese erforderten für die Bordsteine eine steife und für die Platten eine steif-plastische Konsistenz. Als Zement kam ein PZ 45 F eines nordwestdeutschen Herstellers zum Einsatz. Die an einer Stichprobe ermittelten Normdruckfestigkeiten gemäß DIN 1164 lagen nach 2, 7 und 28 Tagen im Mittel bei 27,0, 43,3 bzw. 56,6 N/mm<sup>2</sup>. Der Zuschlag für die Bordsteine hatte ein Größtkorn von 16 mm, der für die Platten 11 mm.

Abweichend von der üblichen Herstellung erhielten die Probekörper eine Bewehrung aus Betonstahl glatt BSt 22/34 mit 6 mm Nenndurchmesser. Um die Einflüsse auf eine mögliche Bewehrungskorrosion in Abhängigkeit von der Tiefenlage zu ermitteln, waren für die Bordsteine jeweils 4 Bügel vorgesehen, durch deren dem Profil des Betonkörpers angepaßte Form eine Überdeckung von 20 bzw. etwa 65 mm erzielt werden sollte (vgl. Bild 57). Die vertikal angeordneten Bügel wurden durch Längs- und Diagonalstreben zu Körben verbunden und mit Kunststoffabstandshaltern versehen. Die Platten enthielten Bewehrungskörbe aus jeweils 3 Bügeln und entsprechenden Quer- und Diagonalstreben (s. a. Bild 45, Abschnitt 3.3.2). Die Überdeckung sollte durch die Form der Bügel und Kunststoffabstandshalter sich auf 20 bzw. 50 mm belaufen. Fertigungsbedingt traten allerdings verschiedentlich Abweichungen der Bügelform und der Korbstabilität und demzufolge veränderte Überdeckungen auf, die jedoch wegen der terminlichen Zwänge hingenommen werden mußten. 18 Gehwegplatten dienten den in Abschnitt 3.3 dargestellten Bewitterungsversuchen auf dem BAM-Gelände, während je 63 Platten und Bordsteine für die Auslagerung zur Verfügung standen.

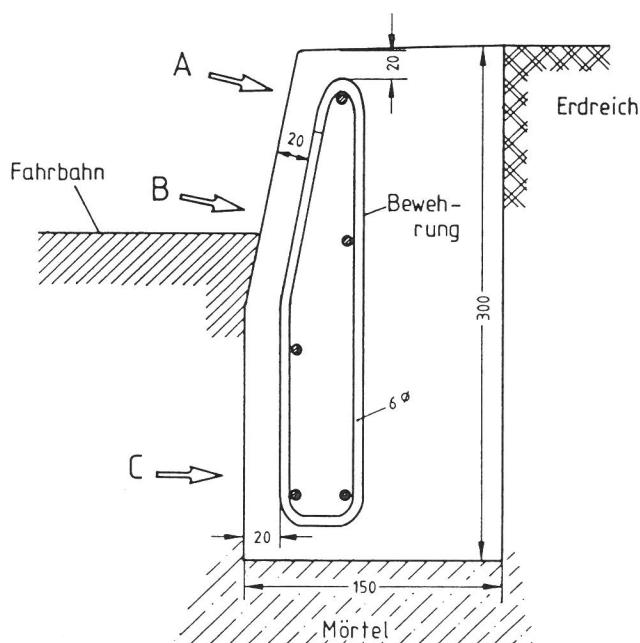


Bild 57  
Querschnitt (schematisch) durch einen eingebauten Versuchskörper in Form eines Bordsteins; die Bohrmehl-Entnahmestellen A, B und C (vgl. Abschn. 3.4.2) sind durch Pfeile markiert

Je ein Probekörper jeder Betonqualität blieb ohne Bewehrung, um hieran die Biegefestigkeit und anschließend entnommenen je 4 Bohrkernen die Druckfestigkeit zu ermitteln (Tab. 6). Ferner dienten drei Bruchstücke jeder

Probe der Bestimmung des offenen Porenraumes durch Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und der Gesamtporosität durch Wasseraufnahme unter 150 bar. Die Ergebnisse sowie die daraus errechneten S-Werte sind in Tab. 7 angegeben. In der Tabelle sind zusätzlich die Porositätswerte enthalten, die an jeweils 12 Bohrkernen aus Platten und Bordsteinen jeder Qualität nach halbjähriger Auslagerung gewonnen worden waren. Während die Bordstein-Proben praktisch die gleichen Werte erzielten, wurden für die Platten durchweg geringere Porositäten gefunden; diese Werte wiederum stimmen mit denjenigen überein, die an den Platten

Bez. d. Beton- qualit.	offene Porosität 1)	Gesamt- porosität	S-Wert
	%	%	—
Bordsteine			
I	11,3 ± 0,4 (11,2 ± 0,3)	15,1	0,75
II	12,1 ± 0,9 (12,0 ± 0,4)	16,3	0,75
III	11,0 ± 0,2 (11,4 ± 0,5)	15,0	0,74
Platten			
I	14,6 ± 0,1 (13,6 ± 0,3)	18,6	0,79
II	15,0 ± 0,2 (13,7 ± 0,8)	17,6	0,85
III	15,3 ± 0,1 (14,8 ± 0,7)	17,8	0,86

Tabelle 7  
Porositätskennwerte der Betone, ermittelt an Bruchstücken vor der Auslagerung

1) die in Klammern aufgeführten Werte wurden an jeweils 12 Bohrkernen 50 mmØ aus 1/2 Jahr aufgelagerten Proben ermittelt

derselben Produktion nach dreijähriger Bewitterung auf dem BAM-Gelände ermittelt worden waren (vgl. Abschnitt 3.3.2). Hieraus ist zu schließen, daß sich das Porengefüge der Plattenbetone innerhalb der ersten Monate noch maßgeblich verändert hat.

Für die Auslagerung der Proben mußten Straßenabschnitte gefunden werden, die verschiedene Bedingungen zu erfüllen hatten. Zunächst mußten sie innerhalb eines der seinerzeit von der BSR aufgestellten Streuplanes für Mischsalz oder herkömmliches Streusalz mit deutlichem Abstand von Berührungspunkten mit Streugebieten der jeweils anderen Salzart



liegen. Die Straßen sollten ähnlich starke Verkehrsbelastung aufweisen. Als Auslagerungsstellen kamen nur Mittelstreifen in Betracht, da am Fahrbahnrand die Salzbelastung durch parkende Autos unkontrollierbar gestört wird. Um eine erhöhte Beanspruchung durch salzhaltiges Schmelzwasser zu gewährleisten, sollte die Querneigung der Fahrbahnen an den Auslagerungsorten zum Mittelstreifen verlaufen. Nach eingehender Prüfung der Pläne und örtlichen Gegebenheiten fiel die Wahl auf die Clayallee im Bezirk Zehlendorf. Am linken Rand der nach Norden führenden Richtungsfahrbahn wurden die Betonproben südlich der Einmündung Dohnenstieg der Natriumchlorid-Streuung bzw. nördlich der Kreuzung Schützallee der Mischsalz-Streuung ausgesetzt. Ferner wurde als salzfreie Vergleichsstrecke der westliche Fahrbahnrand der Onkel-Tom-Straße südlich der Kreuzung Schützallee, ebenfalls im Bezirk Zehlendorf, gewählt. Die in diesem Bereich nur in Granulatstreuplänen befindliche zweispurige Straße wird auch vom Durchgangsverkehr genutzt; seinerzeit salzbelastete Straßen liegen aber in größerem Abstand von dem Auslagerungsort entfernt. Wegen des Durchgangsverkehrs konnte das Abstellen von Fahrzeugen an der gewählten Stelle ausgeschlossen werden, zumal eine mit ausreichenden Parkmöglichkeiten ausgestattete Wohnbebauung nur auf der gegenüberliegenden Straßenseite vorhanden ist.

Die Bordsteine wurden von einer Tiefbaufirma in Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt Zehlendorf mit großer Sorgfalt an den genannten Stellen im Oktober 1980 eingesetzt und die Fugen zum Fahrbahnbelag mit Bitumen vergossen (vgl. a. Bild 57). Unmittelbar hinter den Bordsteinen wurden die Gehwegplatten verlegt, deren glatte Schalungsflächen dem Spritzwasser ausgesetzt werden sollten.

Die Versuchsstrecken wurden bis zum Abschluß der Feldversuche im Frühjahr 1983 regelmäßig inspiziert, wobei schon bald Oberflächenbeschädigungen der Borde an der Clayallee durch Fahrzeugreifen und - im Bereich Schützallee - teilweise auch durch Panzerketten festgestellt werden mußten. Auch ein Abwittern der "Zementhaut" war im ersten Winter schon zu beobachten. Jedoch war der Umfang der Schädigung-

gen gering genug, um die Untersuchungen nicht zu beeinträchtigen. Im Mai 1981 wurden von jeder Versuchsstrecke zwei Bordsteine und zwei Platten je Betonqualität, d. h. insgesamt 36 Probekörper, entnommen und zur weiteren Prüfung in die BAM gebracht. Auf die vorgesehene Entnahme im Frühjahr 1982 wurde verzichtet, da die Salzstreuung in dem vorangegangenen Winter zu einem erheblichen Teil entfallen war. Erst nach einer weiteren Winterperiode wurden im Mai/Juni 1983 dem Programm entsprechend sämtliche Proben der Feldversuche von den Straßen entfernt und den Untersuchungen im Labor zugeführt. Die Porositätsbestimmungen an Bohrkernen von Proben der ersten Entnahmeserie wurden bereits genannt. Die an diesen Proben ermittelten Biegebruchkräfte bestätigen die von der Betonrezeptur her angestrebte und zuvor nur an Einzelproben überprüfte Qualitätsabstufung qualitativ. Eine quantitative Beurteilung hieraus war jedoch nicht sinnvoll, da die Bewehrungskörbe das Biegebruchverhalten beeinflussen haben könnten. Umfangreiche Messungen der Spaltzugfestigkeiten von Bohrkernen aus den Borden und Platten erbrachten keine sinnvollen Bewertungskriterien, da die Streuung der Werte zu groß war. Auf die weiteren Untersuchungen, insbesondere die Bohrmehlentnahmen, wird im Zusammenhang mit den Versuchsergebnissen eingegangen werden.

#### 3.4.2 Untersuchungsergebnisse

An den Gehwegplatten wurden außer den in Abschnitt 3.4.1 genannten Prüfungen zur Charakterisierung der Betone auch Analysen der Chloridgehalte nach der ersten Winterperiode vorgenommen. Dafür dienten Bohrmehlproben aus den Tiefenlagen 0...1 cm und 1...2 cm. Die Chloridanteile lagen zwischen 0,1 und 0,2 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, in der obersten Schicht. Für die folgende, noch über der Bewehrung befindliche Schicht wurden um eine Zehnerpotenz niedrigere Werte ermittelt. Die Belastung der hier eingesetzten Betone durch salzhaltiges Spritzwasser erwies sich somit als äußerst gering. Auch im Hinblick auf die verminderte Salzstreuung in den folgenden Winterperioden waren sinnvoll auswertbare Analysenergebnisse nicht mehr zu

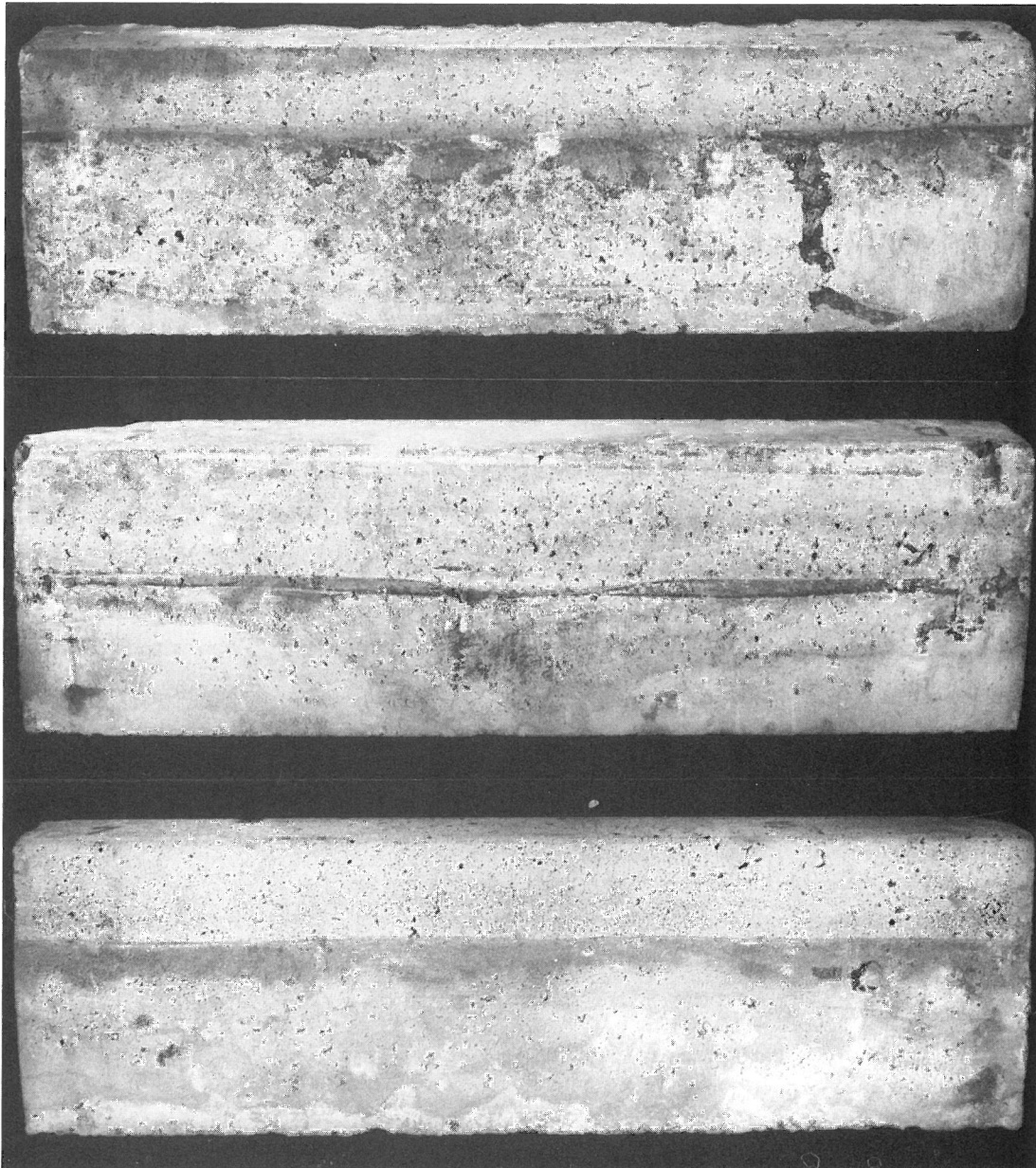


Bild 58  
Bordsteine der lfd. Nr. 7 (Betonqual. I) nach Abschluß der Feldversuche; Beanspruchung (v.o.n.u.): salzfrei, NaCl, Mischsalz

erwarten, so daß auf weitere Prüfungen an den Platten verzichtet werden konnte.

Stärker beansprucht waren die direkt dem Schmelzwasser ausgesetzten Bordsteine. In Bild 58 und 59 sind als Beispiel Borde verschiedener Betonqualitäten nach Abschluß der Feldversuche abgebildet. Es läßt sich feststellen, daß die Probekörper unabhängig von der Salzbelastung, aber abhängig von der Betonqualität abgewittert sind, insbesondere unmittelbar über der Fahrbahnkante. An mehreren Bordsteinen traten Risse über Abstandhaltern sowie Rostflecken vorzugsweise unterhalb der Fahrbahnkante auf, wie auch auf den Bildern zu erkennen ist.

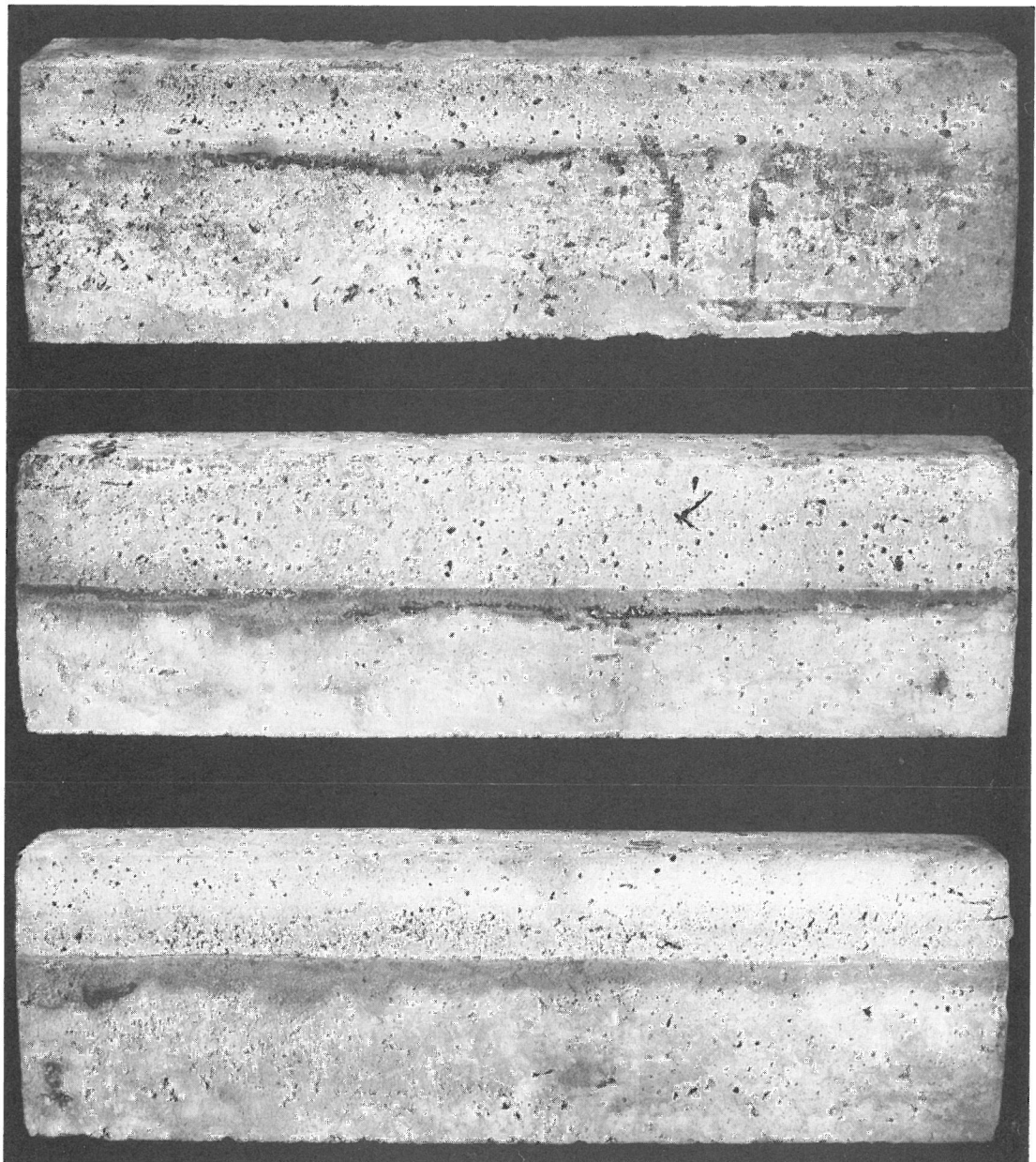


Bild 59  
Bordsteine der lfd. Nr. 8 (Betonqual. II) nach Abschluß der Feldversuche; Beanspruchung (v.o.n.u.): salzfrei, NaCl, Mischsalz

Aus den Bordsteinen, die nach der ersten Streuperiode bereits zur Untersuchung kamen, wurden Bohrmehlproben aus zwei Tiefenlagen an der der Fahrbahn zugewandten Seite unmittelbar über dem Fahrbahnniveau entnommen, da hier die stärkste Belastung angenommen wurde. Die Chloridgehalte lagen in der Außenschicht bei 0,2...0,4 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, also doppelt so hoch wie bei den Gehwegplatten. In der zweiten Schicht wurden ähnlich niedrige Werte wie bei den Platten gefunden. Auffällig war bereits hier, daß auch die Betone an der salzfreien Strecke einen auf ca. 0,1 M.-% erhöhten Chloridgehalt aufwiesen. Nach insgesamt 3 Winterperioden wurden Bohrmehlproben, wie

schon in Bild 57 (Abschnitt 3.4.1) dargestellt, am Bordsteinkopf (A), über der Fahrbahnkante (B) und weit darunter (C) entnommen und analysiert. Die Ergebnisse für die Außenschicht 0...1 cm sind in Bild 60 aufgeführt. Wiederum bestätigt sich die Chloridaufnahme der Betone an der nichtbestreuten Versuchsstrecke, jetzt bereits mit Werten bis zu rd. 0,3 %. Weiterhin ist zu erkennen, daß nahe der Oberkante der Borde etwas höhere und im eigentlich geschützten unteren Bereich zwar etwas niedrigere, aber doch noch erhebliche Chloridgehalte im Vergleich zu den unmittelbar an der Fahrbahnkante ermittelten Werte gefunden wurden. Ferner nehmen die Chloridgehalte absolut - bezogen auf den Beton - und relativ - bezogen auf den rezepturmäßigen Zementgehalt - mit abnehmender Betonqualität zu. Ein gravierender Unterschied zwischen Mischsalz und NaCl tritt nicht auf. Bestenfalls könnte eine Tendenz zu etwas geringeren Werten bei Mischsalzeinwirkung auf Betone der minderen Qualität erkannt werden, wenn man berücksichtigt, daß die Salzstreuung an der NaCl-Strecke während des zweiten Winters zeitweilig ausgesetzt worden war.

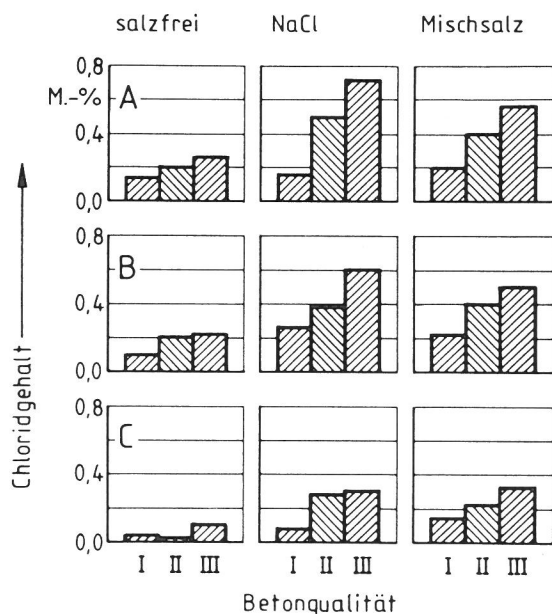


Bild 60  
Chloridgehalte (bez. auf Zementanteil) der Bordsteine in 0...1 cm Abstand von der Oberfläche an den Entnahmestellen A, B und C (vgl. Bild 57)

Bild 61 zeigt die Chloridgehalte in der Tiefenlage 1...2 cm im Vergleich zu denen in der Außenschicht im chloridreichsten Beton III nach dreijähriger Auslagerung. Die Werte fallen selbst hier sehr stark nach innen ab und liegen in der Schicht, die der Bewehrung vorgelagert ist, schon weit unter dem als gefährdend angesehenen Mindestgehalt von 0,4 %. Bei den qualitativ höherwertigen Betonen



I und II wurden entsprechend niedrigere Werte ermittelt. Eine weitergehende Untersuchung der Chloridprofile war daher nicht sinnvoll. Auch der Sprühtest war wegen der insgesamt geringen Chloridgehalte hier nicht anwendbar.

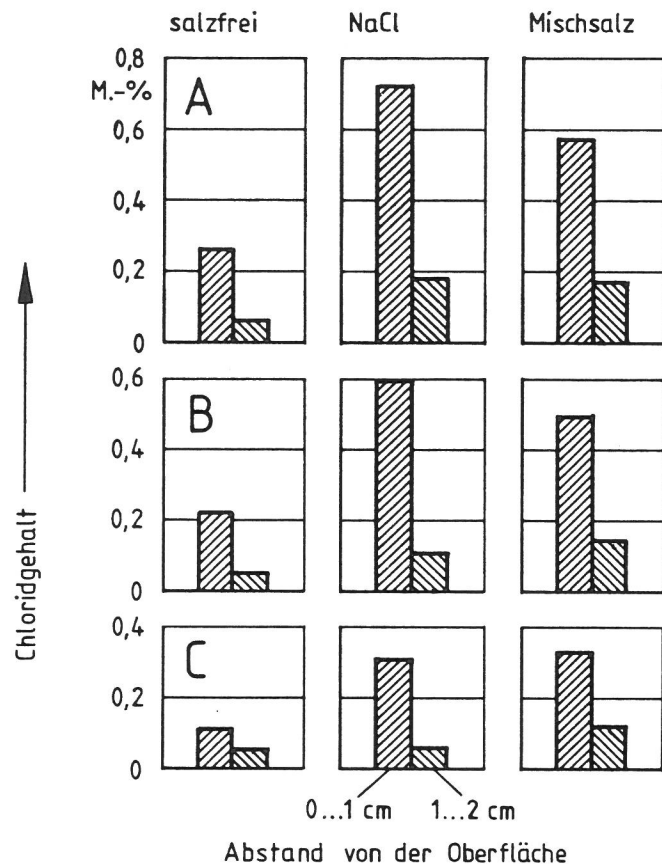


Bild 61  
Chloridgehalte (bez. auf Zementanteil) der beiden äußeren Schichten der Bordsteine der Betonqualität III an den Entnahmestellen A, B und C

Trotz der eingeschränkten Versuchsbedingungen und der damit einhergehenden relativ schwachen Salzbelastung der Betone ergaben sich zumindest Hinweise auf den Zeiteinfluß der Chloridaufnahme in der Praxis. In Bild 62 sind die in der Außenschicht der Bordsteine an der Entnahmestelle B nach einem Jahr und nach 3 Jahren gefundenen Chloridgehalte aufgetragen. Die Meßpunkte "0 Jahre" beinhalten den

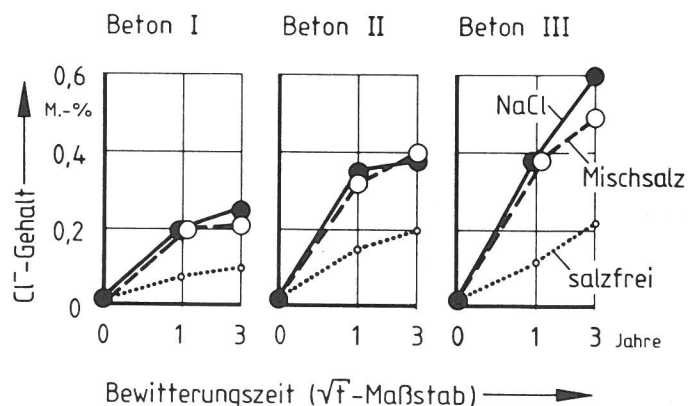


Bild 62  
Chloridgehalte (bez. auf Zementanteil) in der Außenschicht der Bordsteine während der 3jährigen Auslagerung an der salzfreien bzw. mit NaCl bzw. Mischsalz bestreuten Versuchsstrecke

gemessenen Ausgangswert der Betone. Die Darstellung zeigt eine mit zunehmender Zeit sich abschwächende Chloridaufnahme, die möglicherweise mit der Wurzel-Zeit-Beziehung beschrieben werden könnte. Allerdings sollten auf der Grundlage von 3 Meßpunkten keine weitergehenden Schlußfolgerungen gezogen werden. Die Betonqualität, gekennzeichnet durch den Zementgehalt, ist dabei von entscheidendem Einfluß, während die Salzart keine systematischen Unterschiede erkennen läßt. Interessant ist aber auch bei dieser Darstellung die zunehmende Chloridaufnahme der Betone an der salzfreien Versuchsstrecke.

Zu den Rostflecken bzw. Anrostungen der Bewehrung, die nach dem Freilegen beobachtet worden waren, wird in Abschnitt 4 Stellung genommen.

### 3.5 Diskussion

Die schädigende Wirkung von Tausalzen und ihren wäßrigen Lösungen auf Beton setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelvorgängen zusammen, von denen die wichtigsten für die beiden Salzarten untersucht worden sind. Ganz wesentlich ist der Transport der Salzlösung und insbesondere des Chloridions von der Außenfläche in tiefere Lagen des Betons hinein. Hinsichtlich der kapillaren Lösungsaufnahme sind nur geringe Unterschiede zwischen NaCl und Mischsalz festzustellen. Lediglich bei niedrigen NaCl-Konzentrationen wird schneller (Bild 1) und mehr Lösung (Bild 2 u. 3) aufgenommen als bei vergleichbaren Mischsalzlösungen. Für das Chloridion ergibt sich dagegen ein etwas erhöhter Diffusionskoeffizient bei Mischsalzeinwirkung (Tab. 2). Dieses war zu erwarten, da die Diffusion des  $\text{Cl}^-$  auch vom beteiligten Kation beeinflußt wird und der Diffusionskoeffizient für Chlorid aus  $\text{CaCl}_2$ -Lösungen deutlich höher ist als bei NaCl-Lösungen (20). In den an Zementmörtelprismen wie auch an den Bordsteinen des Feldversuchs ermittelten Chloridgehalten kommt die leicht begünstigte Diffusion allerdings nicht zum Ausdruck, da vor allem die Streuung der Meßwerte mögliche Unterschiede überdeckt. Dagegen weisen die an reinen Zementsteinproben gefundenen Werte eine den Diffusionsversuchen entsprechende Tendenz auf



(Bild 15). Auch die Umwandlung von Mineralen der Zementsteinmatrix wird i. a. durch Mischsalz etwas stärker gefördert als durch Natriumchlorid, wenngleich auch hier die Unterschiede gering sind. Allerdings führt die Summe der unbedeutend erscheinenden Differenzen zu deutlich verstärkten Festigkeitseinbußen von dauernd in Mischsalzlösungen eingelagerten Zementmörteln im Vergleich zu denjenigen, die von NaCl-Lösungen beansprucht worden sind (Bild 12 u. 13). Mit steigender Konzentration nimmt der Einfluß beider Salzarten i. a. stetig zu (mit Ausnahme der Ettringitbildung). Ungewöhnliche Erscheinungsformen von Zementsteinmineralen, die auf Mischsalzeinwirkung zurückzuführen wären, sind nicht nachzuweisen gewesen. Andererseits ist bei Langzeiteinwirkung die vom Calciumchloridanteil ausgehende Hygroskopizität hervorzuheben, die möglicherweise zu einer Schadensbildung beitragen kann.

In Tausalzlösungen eingelagerte Betone werden durch Frosttauwechsel bei beiden Salzarten gleichermaßen zerstört, wobei die Wirkung von Mischsalz anscheinend verzögert einsetzt, aber zum gleichen Ergebnis führt. Bedeutsamer sind hier die Einflüsse der Betonvorlagerung bzw. Nachbehandlung nach der Herstellung und die Salzkonzentration. Unterschiede treten jedoch in der Aufnahme und Abgabe von Energie beim Auftauen bzw. Gefrieren auf, die in den Temperaturkurven der entsprechenden Betone zum Ausdruck kommen (Bild 36 u. 37). Für das Auftauen des Eises in einem mischsalzbeanspruchten Beton wird tendenziell mehr Energie benötigt als bei NaCl-Einwirkung. Das Aufstreuen von Mischsalz mindert dagegen den vom NaCl bekannten Temperaturschock, da der  $\text{CaCl}_2$ -Anteil Lösungswärme freisetzt (Bild 38).

Die Freilandversuche auf dem BAM-Gelände wie auch die Feldversuche zeigen, daß die Abwitterung an der Oberfläche infolge z. T. intensiver Tausalzbeanspruchung sich bei hochwertigen Betonen in engen Grenzen hält. Nennenswerte Zerstörungen sind nach insgesamt 3 Winterperioden praktisch noch nicht festzustellen. Gefahrenquellen liegen allerdings in Mikrorissen, die z. B. von Bewehrungsabstandshaltern verursacht werden und den Tausalzen sowie

Wasser und Sauerstoff bis zur Bewehrung vorzudringen ermöglichen. Während hier schon nach einem Winter Rostausscheidungen auftreten, zeigt sich an den tausalzfreien Betonproben nicht einmal Kalksinter an den Mikrorissen, d. h. die kalklösende und rostfördernde Wirkung der Tausalze wird hier offensichtlich. Die Chloridaufnahme der Betonproben hängt, wie bereits erwähnt, in erster Linie von der Betonqualität und der Beanspruchungsintensität und weniger von der Salzart ab. Unter den Bedingungen der Freibewitterung scheint die Chloridaufnahme aus der Mischsalzstreuung sogar tendenziell geringer zu sein als aus der NaCl-Streuung. Möglicherweise spielen hier Auswaschungen durch Niederschläge eine Rolle, die beim Mischsalz wegen der guten Löslichkeit des  $\text{CaCl}_2$  bzw. des  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  erleichtert werden könnten. Die Ergebnisse der Freibewitterungs- und Feldversuche zeigen ferner, daß die Einwirkungsdauer von 3 z. T. eingeschränkten Streuperioden zu kurz gewesen ist, um das Langzeitverhalten von Stahlbeton gegenüber den beiden Salzarten sicher beurteilen zu können. Als weiteres Ergebnis der Feldversuche ist die zwar geringe, aber stetige Chloridaufnahme der Proben an einer nichtbestreuten Strecke zu sehen. Hieraus wird deutlich, daß mit Tausalzschäden auch im weiteren Umkreis von salzbelasteten Straßen gerechnet werden muß.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß der Calciumchloridanteil im Mischsalz grundsätzlich zu einer stärkeren Beanspruchung des Betons führen kann als sie vom reinen Natriumchlorid ausgeht. Insgesamt aber sind die Unterschiede in der Wirkung von Mischsalz und NaCl gering. Unter Praxisbedingungen scheint, soweit dies nach begrenzter Versuchsdauer abzuschätzen ist, das Mischsalz nicht schädlicher für den Beton zu sein als Natriumchlorid. Zum Langzeitverhalten von Stahlbeton gegenüber Mischsalz bei üblichem Winterdienst kann jedoch noch keine eindeutige Aussage getroffen werden.

#### 4 Untersuchungen zur Korrosion von Bewehrungsstahl

Die Porenflüssigkeit von Beton ist aufgrund ihres Gehaltes an Kalziumhydroxid alkalisch. Sie besitzt in der Regel einen pH-Wert von über 12. In einem derartigen Milieu ist Stahl passiv, d. h. mit einer dünnen Oxidschicht, der sog. Passivschicht bedeckt. Diese Schicht hat eine ausgezeichnete Korrosionsschutzwirkung, weil sie die anodische Auflösung von Eisen in Gegenwart von Feuchtigkeit verhindert. Die kathodischen Teilschritte der Korrosion werden hingegen nur unwesentlich behindert. So kann also der mit der Feuchtigkeit an die Stahloberfläche gelangende gelöste Sauerstoff im Bedarfsfall reduziert werden.

Werden Passivschichten örtlich begrenzt zerstört, werden also kleine Bereiche lokal begrenzt aktiviert, sorgt der an den kathodischen Bereichen angebotene und reduzierte Sauerstoff dafür, daß das Eisen an diesen Bereichen korrodiert wird. Infolge des meist hohen Verhältnisses von Kathoden- zur Anodenoberfläche werden lokal aktive Bereiche sogar mit erhöhter Geschwindigkeit korrodiert. In diesem Fall kehrt sich die korrosionsschützende Wirkung der Passivschicht um in eine korrosionsfördernde, elementbegünstigende Eigenschaft.

Insbesondere die in den Tausalzen enthaltenen Chloride gehören zu den Stoffen, die Passivschichten örtlich zerstören und so den Korrosionsangriff von Bewehrungsstahl auch dann auslösen können, wenn der pH-Wert des Milieus noch ausreichend hoch ist. Chloridanreicherungen durch elektrolytische Überführung und hydrolysebedingte Ansäuerungen der Elektrolyten im Anodenbereich sorgen zusätzlich zur elementbedingten Korrosion für eine weitere Beschleunigung der Zerstörung. Chloridinduzierte Korrosionsschäden an Bewehrungsstählen im Beton zeichnen sich daher immer durch starke Materialzehrungen an begrenzten Bereichen aus.

Voraussetzung für eine schädliche Wirkung des Chloridions ist das Überschreiten von Grenzkonzentrationen an der passiven Stahloberfläche. Gelangt Tausalz an die Beton-

Oberfläche, kann aber immer davon ausgegangen werden, daß Chloride in ausreichender Konzentration an den Stahl gelangen. Insbesondere die äußeren Bewehrungslagen werden von dem Chlorid erreicht. Es kann durch Risse im Beton relativ schnell oder auf dem Diffusionsweg durch den Beton langsam an den Stahl gelangen. Insbesondere die äußeren Bewehrungslagen werden von dem Chlorid erreicht. Der Bewehrungsstahl ist selbstverständlich nur dort passiv, also korrosionsgeschützt, wo er im Kontakt mit Beton steht. Stahloberflächen, die nicht mit der alkalischen Porenflüssigkeit beaufschlagt werden, sind also aktiv, d. h. nicht korrosionsgeschützt. Derartige Bereiche liegen z. B. an Rissen, Kiesnestern, groben Poren, unter Abstandshaltern u. dgl. vor. Korrosionschemisch verhalten sich diese Stahloberflächen wie solche, die durch Chlorideinwirkung innerhalb des Betons aktiviert wurden. Auch sie stellen kleine Anodenoberflächen dar, die in Wechselwirkung mit den Kathoden, den passivierten Stahloberflächen stehen. Es bilden sich also ebenfalls Korrosionselemente nach dem oben geschilderten Mechanismus.

Ob diese Korrosionselemente größere Korrosionsschäden am Bewehrungsstahl anrichten, hängt vom Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung ab. Ist sie wassergesättigt, wird bei kleinflächigen Fehlstellen auch der Hohlraumelektrolyt alkalisch und der Stahl passiviert. Ist der Beton trocken, ist die Korrosionsgefahr ebenfalls gering. Bei mittlerem Feuchtigkeitsgehalt sind die Voraussetzungen für eine aktive Elementtätigkeit am günstigsten. Erfahrungsgemäß sind derartige Bedingungen in Randzonen von Betonbauwerken anzutreffen, die mit Erdböden in Berührung stehen. Sie wirken als zusätzlicher und besonders wirkungsvoller Elektrolyt auch insofern korrosionsfördernd, als sie durch Vergrößerung des Elektrolytraumes größere Stahl-/Betonoberflächen an die Elementaktivität einbeziehen. Sie vergrößern also die Kathodenoberfläche und somit die Korrosionsgeschwindigkeit der aktivierten Stahlflächen. Der korrosionsfördernde Einfluß des umgebenden Bodens wächst mit seiner elektrolytischen Leitfähigkeit und diese mit zunehmendem Salz- und Wassergehalt.

Auch diese Art der Elementkorrosion hat eine Anreicherung von Salzen im Anodenraum, also in der Nachbarschaft des korrodierenden Stahles zur Folge. Die hydrolysebedingte Ansäuerung des hier anwesenden Elektrolyten beschleunigt den Korrosionsangriff und die Ausbreitung des Korrosionsherdes durch Neutralisation des benachbarten Betons.

Die vorstehenden Ausführungen sollen darauf hinweisen, daß die Stahlbewehrung in Stahlbetonbauwerken auch dann stark korrodiert werden kann, wenn der Beton nicht karbonatisiert ist und sein Chloridgehalt unter den bekannten kritischen Grenzwerten liegt.

#### 4.1 Einfluß der Salzart

Lösliche Chloride wirken unabhängig von dem mit ihnen verbundenen Kation korrosionsfördernd. Um festzustellen, ob es graduelle Unterschiede in der schädlichen Wirkung gibt, sind Dauertauchversuche mit Blechen aus dem Stahl St 37 durchgeführt worden. Bleche mit den Abmessungen 126 x 23 x 1 mm sind entfettet und gewogen in folgende Lösungen getaucht worden:

- a) 1 n NaCl in gesättigter  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung
- b) Mischsalz aus 2 n NaCl : 1 n  $\text{CaCl}_2$  = 4:1 in ges.  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung
- c) 1 n  $\text{CaCl}_2$  in ges.  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung.

Diese Lösungen sollen die Porenflüssigkeit von Betonen repräsentieren, die mit verschiedenen Tausalzen beaufschlagt wurden. Sie wurden zur Aufrechterhaltung des hohen pH-Wertes mit einem Bodensatz aus festem  $\text{Ca(OH)}_2$  angesetzt und regelmäßig umgerührt.

Während der Gesamtauslagerungsdauer von 400 Tagen sind alle hundert Tage jeweils 3 Proben entnommen worden. Sie wurden mit Sparbeize von evtl. vorhandenen Korrosionsprodukten befreit und zurückgewogen. Die Massenverluste sind in der Tabelle 8 zusammengestellt.

Lösung \ Tage	100	200	300	400
a) 1 n NaCl	23	42	61	63
b) Mischsalz	28	51	81	112
c) 1 n CaCl <sub>2</sub>	37	66	95	125

Tabelle 8  
Massenverluste in g/m<sup>2</sup> von St37-Bleichen im  
Dauertauchversuch in salzhaltiger ges.  
Ca(OH)<sub>2</sub>-Lösung

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Bleche in allen mit den verschiedenen Salzen versetzten Calciumhydroxid-Lösungen Lochkorrosion erleiden. Dieser Angriff entspricht einem örtlich begrenzten Angriff von Bewehrungsstahl im Beton. Wie die graphische Darstellung der Ergebnisse in Bild 63 zeigt, ist der als Folge der Lochkorrosion entstandene Materialverlust in CaCl<sub>2</sub>-haltigem Kalkwasser deutlicher als in NaCl-haltigem. Während sich die differentielle Abtragungsrate, also die Korrosionsgeschwindigkeit, in der NaCl-haltigen Lösung im Laufe der Zeit verringert, bleibt sie in CaCl<sub>2</sub>-haltigen Lösungen konstant und höher als in

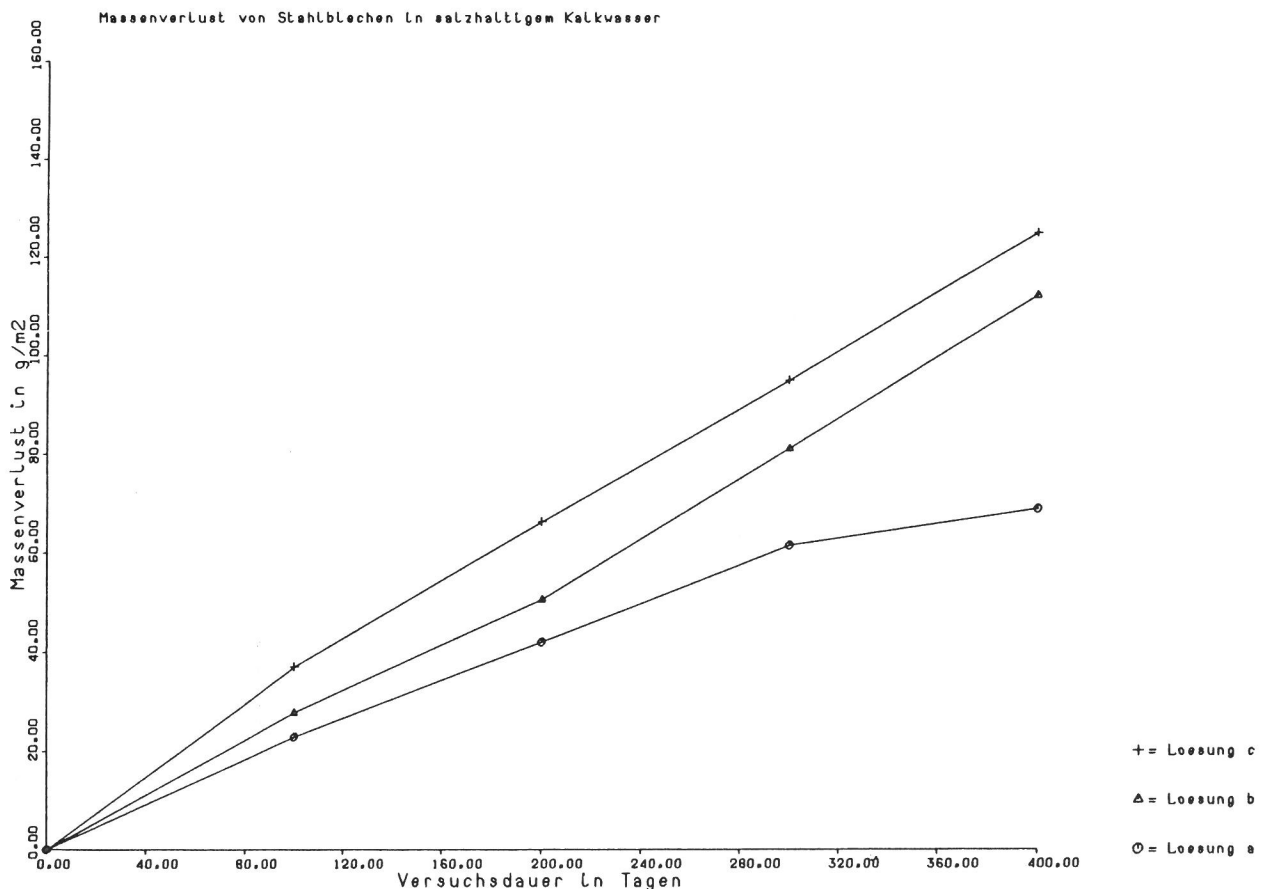


Bild 63  
Masseverlust von Stahlblechen in salzhaltigem Kalkwasser



kochsalzhaltiger Lösung. Dieser Unterschied ist möglicherweise auf die Erhöhung der  $\text{Ca(OH)}_2$ -Löslichkeit in Gegenwart von Alkaliionen zurückzuführen. Hierdurch könnte der pH-Wert besser stabilisiert und die Repassivierung erleichtert werden. Da aber in allen Salzen Korrosionsangriffe entstehen, ist der Unterschied in der Korrosionsbelastung von Stahl durch die verschiedenen Salze nur unerheblich. Bild 64 zeigt als Beispiel 300 d beanspruchte Bleche.



Bild 64  
Stahlbleche nach Dauertauchversuch  
(300 d) in salzhaltigem Kalkwasser

Während in den vorstehend beschriebenen Untersuchungen das Chloridion direkten Zugang zur Stahloberfläche hatte, konnte es in den folgenden Untersuchungen erst nach Durchdringen einer 10 mm dicken Mörtelüberdeckung an die Stahloberfläche gelangen. In den folgenden Untersuchungen sind also Rundstahlproben entsprechend Bild 65 in Mörtel mit feinkörnigen Zuschlägen eingebettet worden. Die Herstellung der Proben erfolgte in Anlehnung an die Prüfrichtlinien für Betonzusatzmittel des Instituts für Bautechnik.

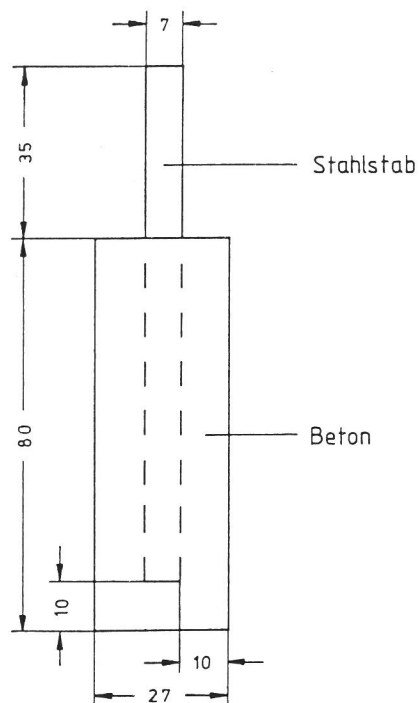


Bild 65  
Prüfkörper für Dauertauchversuche  
in salzhaltigem Kalkwasser

Die Prüflinge sind bis kurz unter die Oberkante des Mörtelzylinders in die genannten Lösungen getaucht worden. Um ein Anrosten der aus dem Mörtel herausragende Rundstähle durch aufsteigende Lösung zu vermeiden, sind diese Stahlbereiche mit Vaseline abgedeckt worden. Die gesamte Versuchszeit betrug 489 Tage. Nach Auslagerungszeiten von 96, 250, 350 und am Ende der Untersuchung sind jeweils 3 Probekörper entnommen worden. Sie wurden aufgeschlagen, d. H. vom Mörtel befreit und visuell beurteilt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 9 beschrieben.

Tage Lösung	96	250	350	489
a) 1 n NaCl	k.K.	k.K.	k.K.	k.K.
b) Mischsalz	k.K.	k.K.	k.K.	k.K.
c) 1 n CaCl <sub>2</sub>	k.K.	k.K.	k.K.	k.K.

Tabelle 9  
Korrosionszustand von Stahl in Mörtel-  
bettung im Dauertauchversuch

k.K. = kein Korrosionsangriff

Sie zeigen einmal, daß diese Methode ungeeignet ist, Unterschiede in der Korrosivität von Salzen sichtbar zu machen. Man kann aber davon ausgehen, daß bei diesen Versuchen das Chlorid durch den Mörtel bis an den Stahl gelangt ist. Die dort erreichte Konzentration hat aber nicht ausgereicht, um die Passivschicht des Stahles zu

zerstören und einen örtlichen Korrosionsangriff auszulösen.

#### 4.2 Elektrochemische Messungen

Die Zerstörung der Passivschicht von Stahl in feuchter Umgebung ist mit einer deutlichen Veränderung des freien Korrosionspotentials verbunden. Durch Messen dieses Potentials kann demnach festgestellt werden, wann der chloridbedingte Korrosionsangriff des Bewehrungsstahles im Beton oder allgemein in einem ausreichend alkalischen Milieu beginnt.

Mit Hilfe dieser Möglichkeit sollte ebenfalls versucht werden, Unterschiede im Korrosionsverhalten der verschiedenen Salze gegenüber Bewehrungsstahl herauszuarbeiten. Hierzu sind in einer Versuchsreihe Rundstähle aus dem Stahl St37 in die unter 4.1 genannten Lösungen und in gesättigte  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung ohne Salz getaucht worden. Das Potential des Stahles ist mit einer Bezugselektrode (ges. Kalomel) gemessen worden. Im Bild 66 sind die Meßergebnisse aufgetragen. Das freie Korrosionspotential des von der salzfreien Lauge umgebenen Stahles verweilt über die gesamte Versuchszeit bei ca. -200 mV. In diesem Potentialbereich ist und bleibt Stahl passiv, wird also nicht korrodiert.

Der Potentialverlauf in allen salzhaltigen Lösungen kennzeichnet den korrosionsfördernden Einfluß der Chloride. In allen drei Medien fällt das Potential nahezu spontan bis in den Bereich von -600 mV. In diesem Bereich wird Stahl aktiv korrodiert. Alle drei Salze aktivieren den Stahl in gleicher Weise mit gleicher Geschwindigkeit. Ein salzbedingter Unterschied ist zumindest in der Anfangsphase nicht zu erkennen.

Im Bereich von 100 bis 200 Tagen veredelt sich das Potential des Stahles in der kochsalzhaltigen Lauge. Dieser Potentialanstieg charakterisiert eine gewisse Tendenz zur Repassivierung. Das bedeutet, daß die Möglichkeit zur Aus-

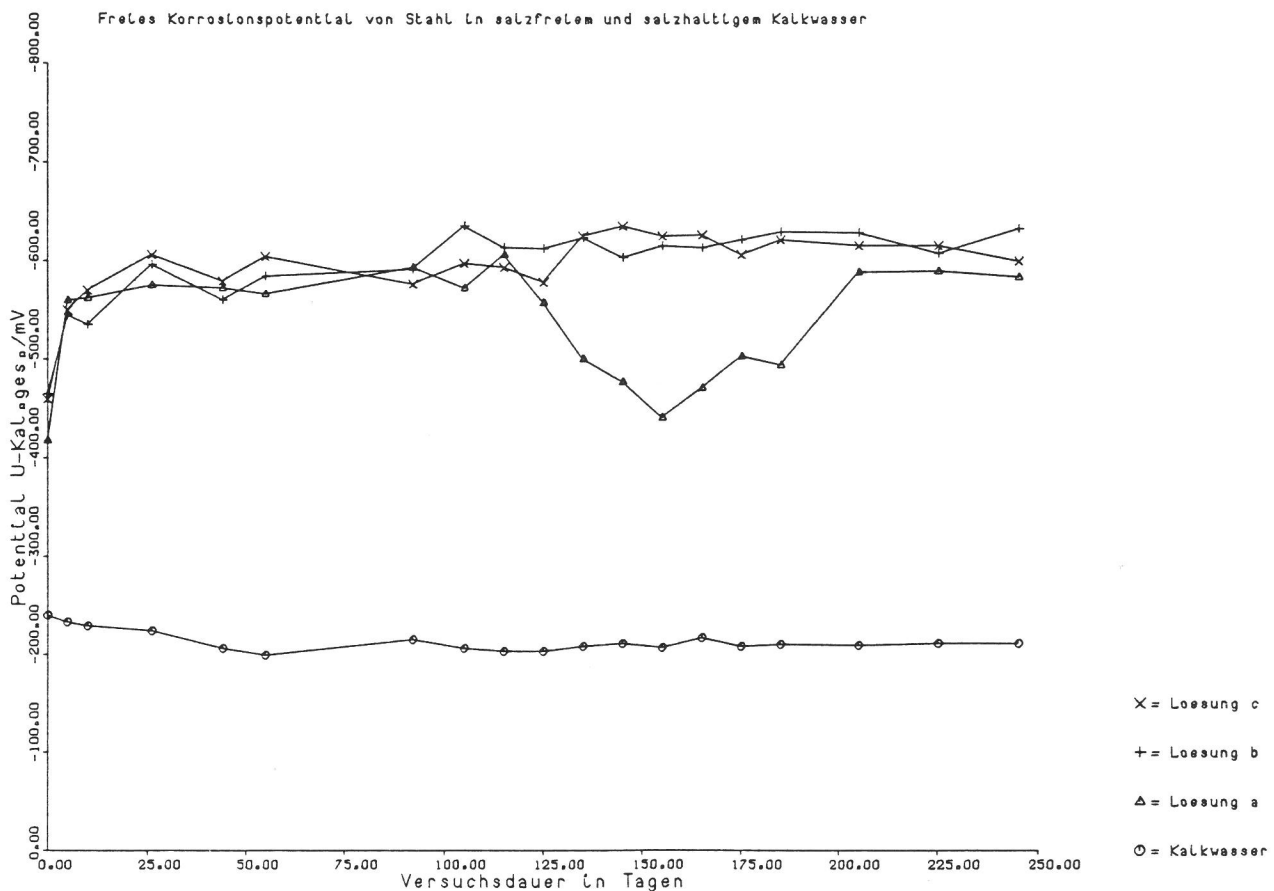


Bild 66

Freies Korrosionspotential von Stahl in salzfreiem und salzhaltigem Kalkwasser

heilung der Passivschicht oder zur Unterbrechung des Korrosionsangriffes in NaCl-haltiger Lauge besser ist als  $\text{CaCl}_2$ -haltiger. Insofern werden die in Bild 63 erkennbaren Unterschiede in der Korrosivität bestätigt. Auf die möglichen Ursachen ist in 4.1 schon hingewiesen worden. Andererseits sind die Meßwerte nur an einer Stahlelektrode gewonnen worden. Sie sind also für eine fundierte Interpretation nicht genügend abgesichert.

Zusätzlich zu den vorstehend beschriebenen Untersuchungen in Kalziumhydroxidlösung (Kalkwasser) sind elektrochemische Messungen zur Untersuchung des Korrosionsverhaltens von Chloriden auch an Stahl durchgeführt worden, der in Beton eingebettet war. Aus einem Beton, dessen Kennwerte der Tabelle 1 (Abschn. 3.1.2) zu entnehmen sind, sind von einem Kasten aus Kunststoff umhüllte Prüfkörper angefertigt worden. Form und Abmessung sind in Bild 67 dargestellt. In diese Betonprismen sind in Abständen von 10, 20, 30, 40 und 50 mm von dessen Oberkante jeweils zwei Stahlstäbe aus St37 eingegossen. Jedes dieser Elektroden-

paare ist gegen seine Nachbarn um  $90^\circ$  versetzt angeordnet. Die Enden der Stäbe sind am Übergangsbereich Beton/Kunststoff bis in den Beton hinein mit einer Korrosionsschutzbeschichtung versehen und beidseitig durch den Mantel geführt worden. An einem Ende jedes Stabes befand sich der Abgriff für die elektrochemische Messung.

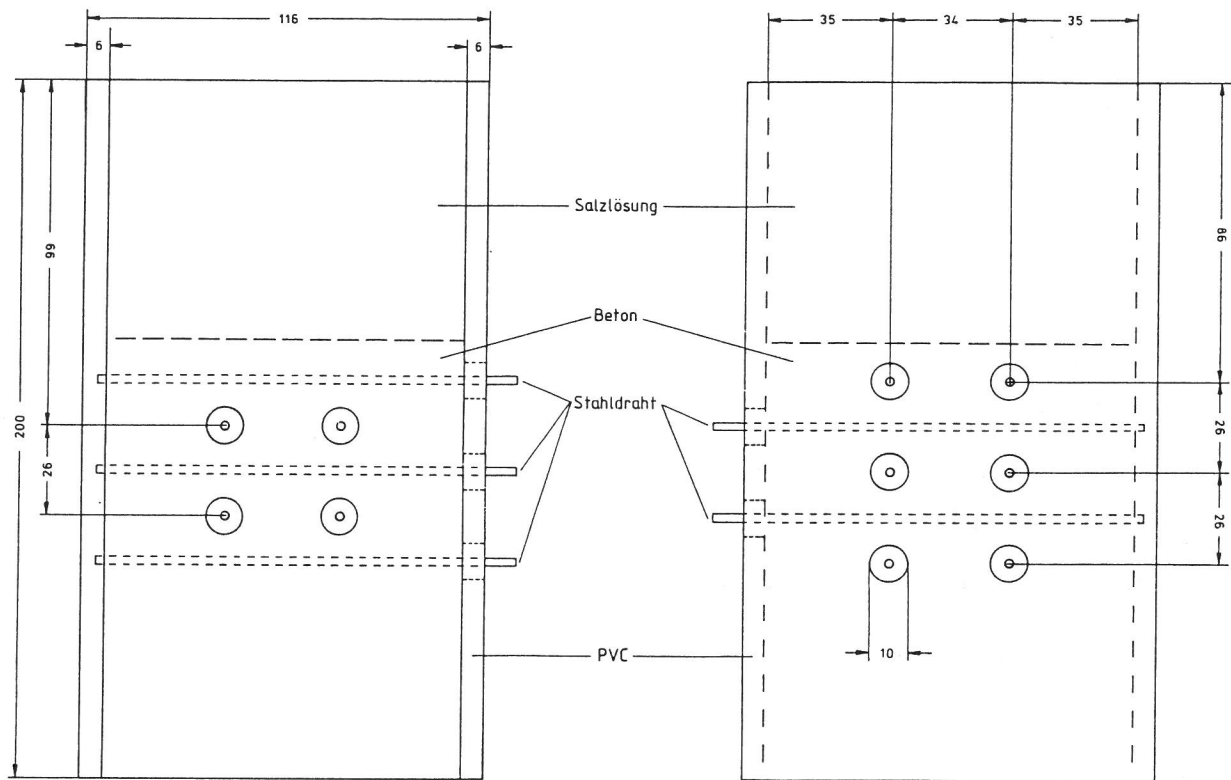


Bild 67  
Betonprisma mit Stahlelektroden

Der obere Rand des Betonkörpers ist mit Silikonkautschuk gegen die Wandung des Kunststoffgefäßes abgedichtet worden, damit kein Wasser zwischen Beton und Kunststoffmantel eindringen konnte. So vorbereitet, wurde der Betonkörper mit den in 4.1 beschriebenen Salzlösungen und mit Leitungswasser überschichtet. Für jede Lösung waren zwei Betonkörper vorgesehen. Der Wasserspiegel der Lösung ist ständig auf konstantem Niveau gehalten worden. Die Potentialmessung an den Stahlelektroden erfolgte gegen eine in die Lösung tauchende Kalomelelektrode.

Anhand der Entwicklung der freien Korrosionspotentiale der Stahlelektroden im Laufe der Versuchszeit sollten salzartbedingte Unterschiede in der Eindringrate und der Korrosivität der Lösungen erfaßt werden. Die diskontinuierlich gemessenen Potentiale der Elektroden sind in den Bildern

68-71 aufgetragen. Die eingezeichneten Meßwerte sind Mittelwerte aus den zwei Elektroden jedes Probekörpers, also aus insgesamt 4 Einzelmeßwerten.

Bild 68 zeigt den Potentialverlauf der Stähle mit unterschiedlicher Betonüberdeckung für Leitungswasser als Prüfmedium. Die Potentiale aller Elektroden bleiben in dem Bereich des passiven Stahles. Die Stahlstäbe werden also erwartungsgemäß über die gesamte Beanspruchungsdauer nicht korrodiert. Im Vergleich hierzu zeigen die Bilder 69-71, daß alle Chloridlösungen aktivierend, also korrosionsfördernd wirksam sind. Erkennbar ist dieser Einfluß wiederum an dem Abfall des Potentials vom passiven in den aktiven Bereich des Stahles. Wie zu erwarten, werden die Stahleinlagen in der Regel je später aktiviert, desto größer die Betonüberdeckung ist.

Ein Vergleich der Tendenzen des Kurvenverlaufs in den Bildern 69-71 zeigt, daß in den kochsalzbeaufschlagten Betonkörpern alle Stahldrähte aktiviert worden sind, in

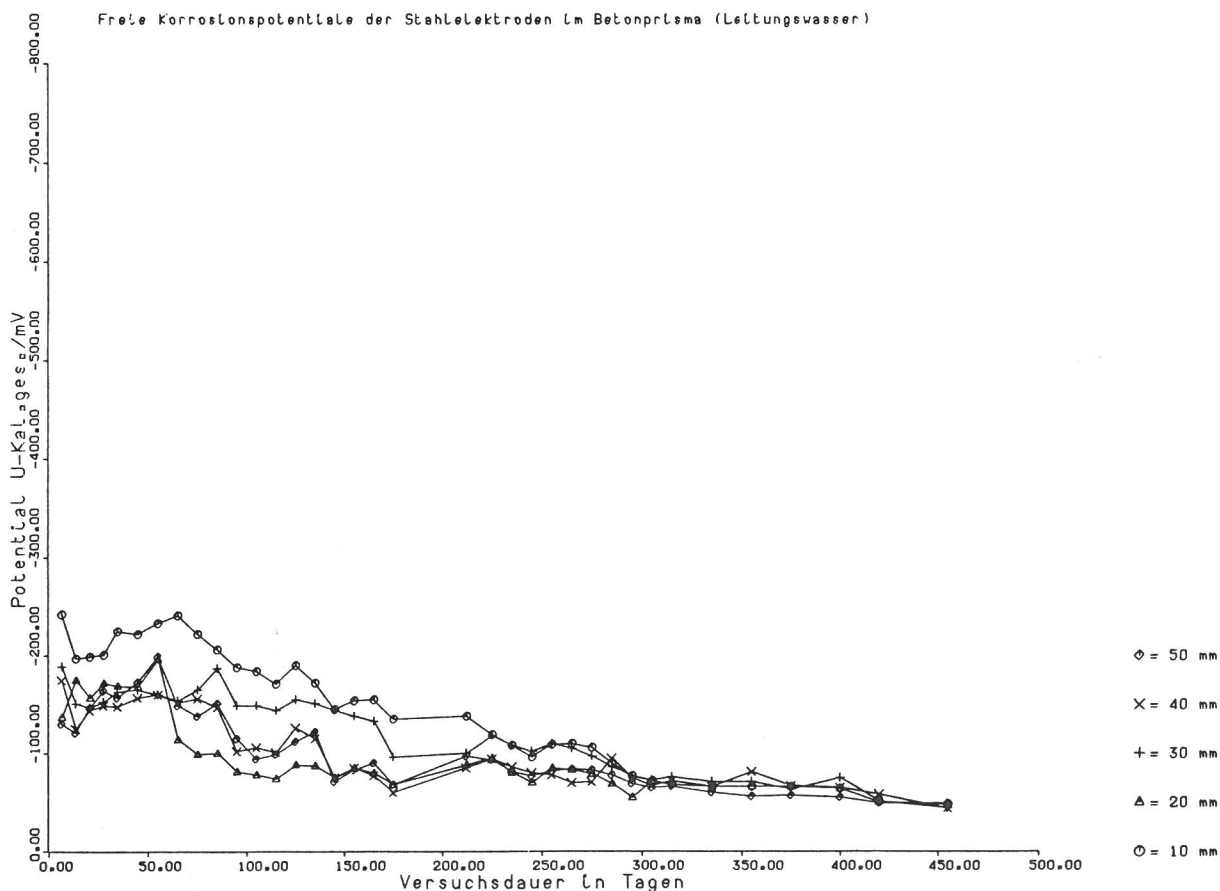


Bild 68  
Freie Korrosionspotentiale der Stahlelektroden im Betonprisma, mit Leitungswasser beaufschlagt



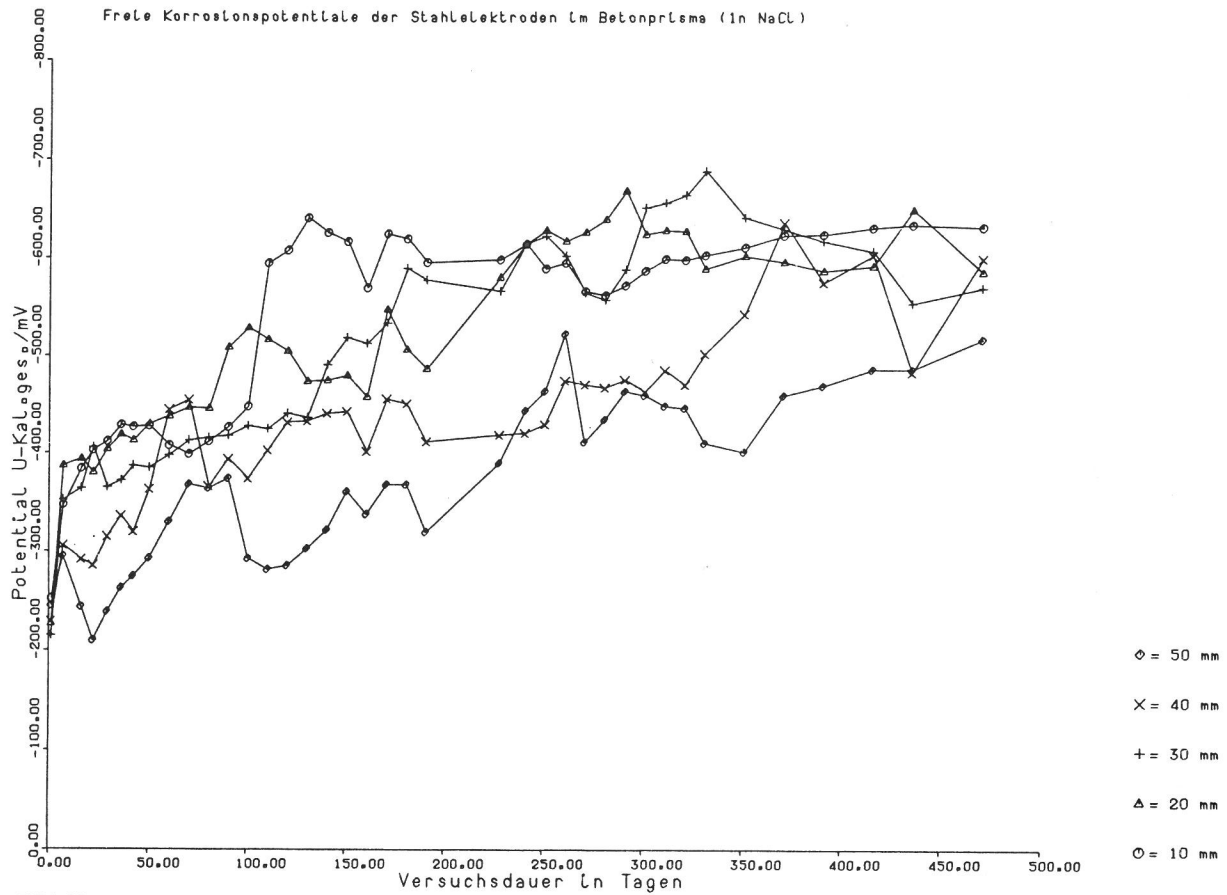


Bild 69

Freie Korrosionspotentiale der Stahlelektroden im Betonprisma, mit 1 n NaCl-Kalkwasser beaufschlagt

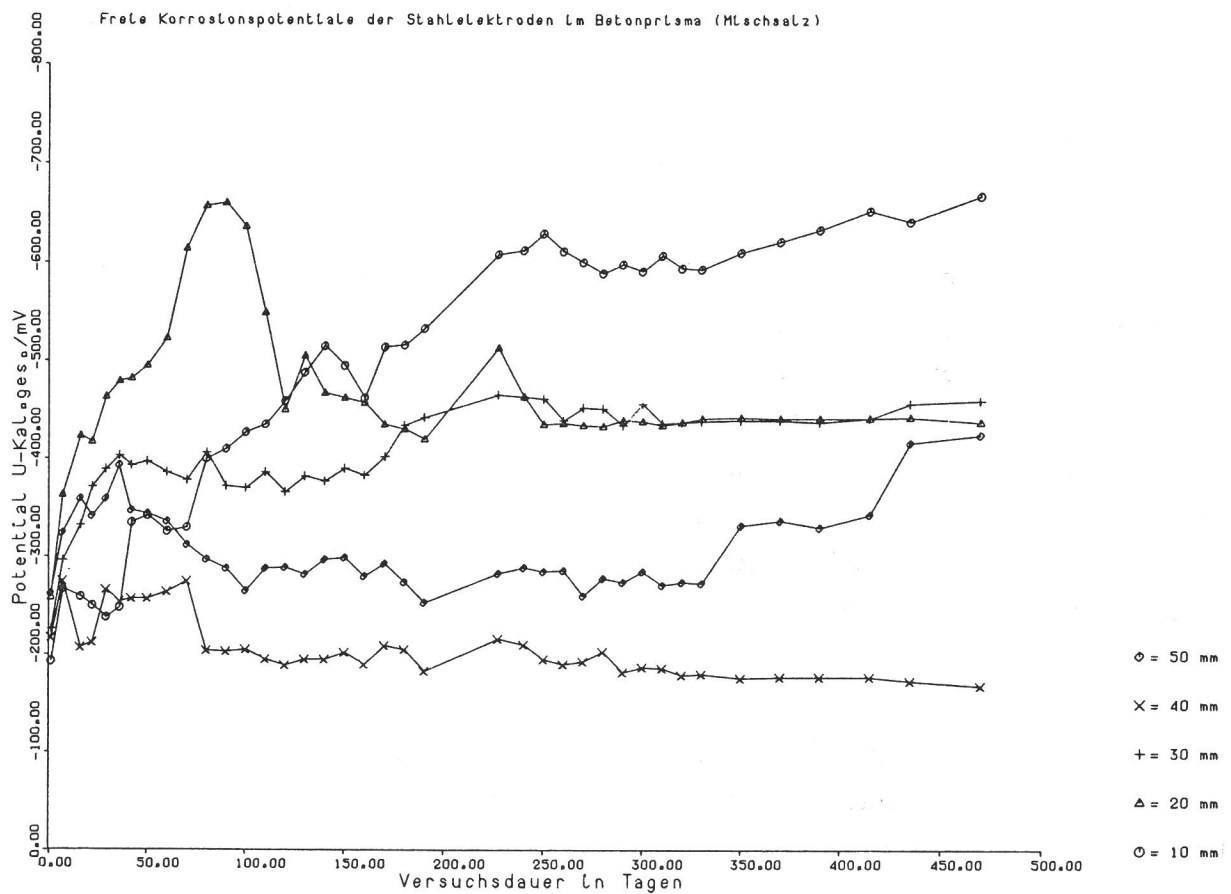


Bild 70

Freie Korrosionspotentiale der Stahlelektroden im Betonprisma, mit salzhaltigem Kalkwasser (1 n NaCl: 1 n  $\text{CaCl}_2 = 4:1$ ) beaufschlagt

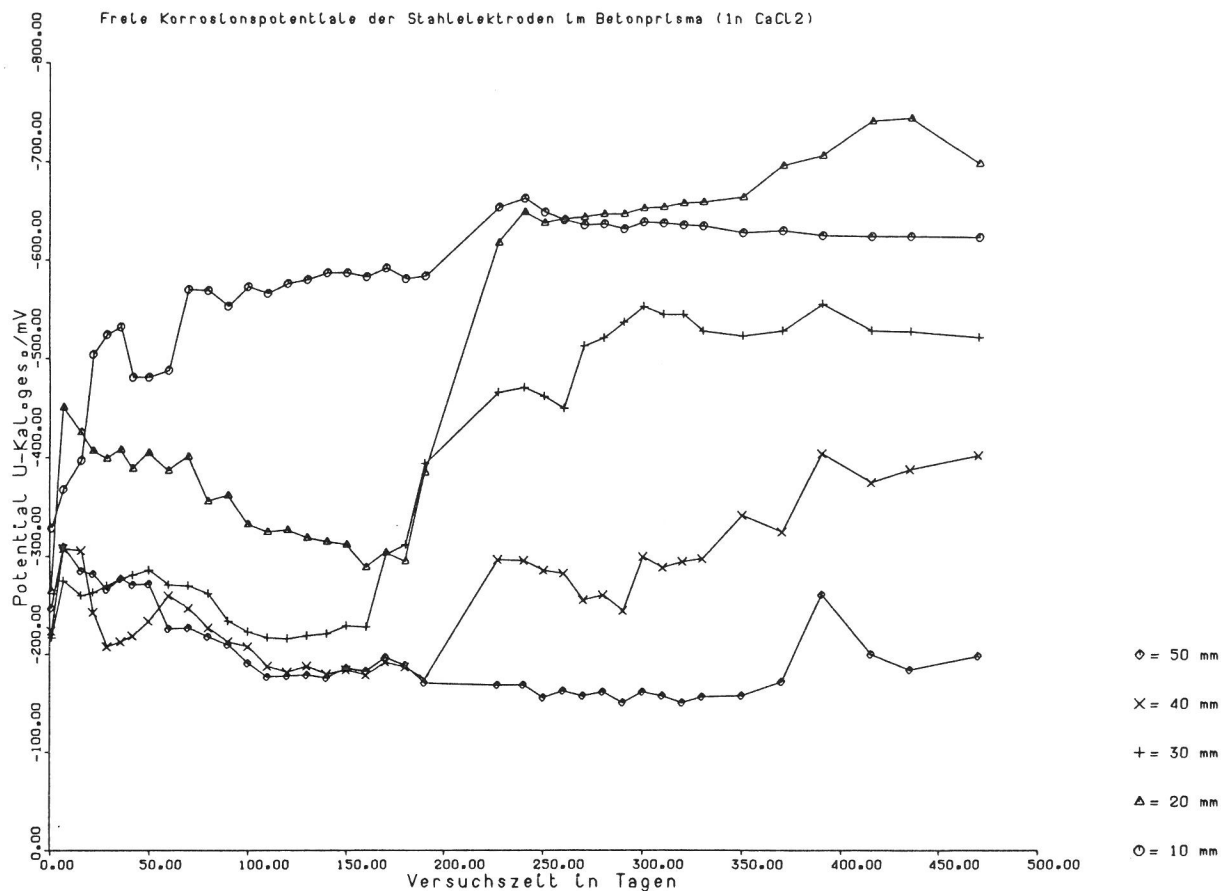


Bild 71

Freie Korrosionspotentiale der Stahlelektroden im Betonprisma, mit 1n CaCl<sub>2</sub>-Kalkwasser beaufschlagt

den CaCl<sub>2</sub>-haltigen hingegen die unteren Stähle noch weitgehend passiv sind. Aus diesem unterschiedlichen Verhalten könnte abgeleitet werden, daß die korrosive Wirkung von CaCl<sub>2</sub> um Nuancen geringer ist als die von NaCl.

Eine Überprüfung der Chloridverteilung im Betonkörper hat ergeben, daß die Chloridfront unabhängig von der Salzart in allen Betonprismen am Ende der Versuchszeit alle Stähle erreicht hatte. Trotzdem sind in den CaCl<sub>2</sub>-haltigen Probekörpern die unteren Stähle noch weitestgehend passiv geblieben. Der sich hierdurch auszeichnende geringe Unterschied in der Korrosivität von NaCl und CaCl<sub>2</sub> im Beton ist nicht gravierend, so daß auf Deutungsversuche verzichtet werden kann.

Auch unter diesen Versuchsbedingungen zeigt sich, daß Chloride grundsätzlich korrosionsfördernd wirken. Geringe Unterschiede in der Korrosivität, wie sie sich hier gezeigt haben, sind für die Praxis ohne Bedeutung.

Während in den Dauertauchversuchen nach ca. 400 Tagen noch kein Stahl unter vergleichbarer Korrosionsbelastung angegriffen war, wurden die Stahlproben im Beton trotz z. T. wesentlich größerer Überdeckung bereits nach viel kürzeren Zeiten aktiviert. Der korrosionsfördernde Einfluß von Chloriden wirkt sich demnach in Beton wesentlich stärker aus, als in dichtem Mörtel. Eine Abwägung aller Umstände zeigt, daß dieser Unterschied wohl nicht mit dem unterschiedlichen Diffusionsvermögen gelösten Sauerstoffs erklärt werden kann. Auch an die wesentlich stärker überdeckten aber trotzdem korrodierten Stähle im Beton gelangt der Sauerstoff nur mühsam. Vielmehr ist der Unterschied eher auf den innigeren Kontakt des Stahles mit dem Zementstein im dichten Mörtel zurückzuführen. Im Beton wird dieser enge Kontakt durch die größeren Zuschlagstoffe offensichtlich verschlechtert. Hier sind größere Bereiche, z. B. durch Spalt- oder Hohlraumbildung, in Gegenwart aggressiver Stoffe nicht so gut geschützt wie in dichtem Mörtel. An derartigen "Schwachstellen" in korrosionschemischen Sinne können Chloride also gefährlicher sein als an Stahloberflächen mit direktem Kontakt zum Zementstein.

Zusammengefaßt haben die Laborversuche gezeigt, daß sich die Korrosivität der Salze  $\text{NaCl}$  und  $\text{CaCl}_2$  gegenüber Stahl in erdalkalischer Umgebung, also gegenüber Bewehrungsstahl in zementhaltigen Baustoffen nicht signifikant unterscheidet. In ausreichend hoher Konzentration sind beide Salze in der Lage, Passivschichten auf Stahl zu zerstören und Bewehrungsstahl im Beton zu korrodieren. Die beobachteten geringen und sich widersprechenden Unterschiede zwischen beiden Salzen sind für die Baupraxis ohne Relevanz. Bei beiden Salzarten wird sich einer chloridinduzierten Anfangskorrosion im Bauwerk eine Elementkorrosion anschließen. Diese Elementkorrosion bestimmt letztendlich den Zerstörungsgrad des Stahles und dessen Korrosionsgeschwindigkeit. Letztere nimmt zwar mit steigendem Salzgehalt im Beton zu, ist aber von dem Kation des Chlorides wenig oder gar nicht abhängig. Hierbei werden die Einflüsse der Betoneigenschaften die der Salzart wesentlich übersteigen.

### 4.3 Zustand der Bewehrung

Aus den drei Jahre an Straßen ausgelagerten Bordsteinen, die mit den Salzen bestreut wurden, sind einige Bewehrungsstähle aus unterschiedlicher Tiefe entnommen worden. An diesen Stählen waren vereinzelt kleine Rostflecken zu erkennen, die sich unter dem Mikroskop als Rostnarben mit geringer Eindringtiefe erwiesen. Es bestand kein Zusammenhang zwischen diesen Korrosionserscheinungen und der Betonüberdeckung. Tüpfelanalysen an den Stählen wiesen lediglich vernachlässigbar kleine Chloridgehalte nach. Bei den Roststellen handelt es sich demnach nicht um beginnende chloridinduzierte Korrosion, sondern um Korrosionsangriffe, wie sie durch die Betonfeuchtigkeit an kleinen Hohlräumen oder Spalten ausgelöst werden können.

Nach drei Wintern sind auch die Bewehrungsstähle aus den Betonplatten der Freibewitterungsversuche entnommen worden. An den aus nicht bestreuten Platten entnommenen Stählen waren keine Korrosionsschäden zu erkennen. Hingegen dienten die unterschiedlichen Streusalze, mit denen die übrigen Platten behandelt wurden, geradezu als Indikator für korrosionschemische Schwachstellen im Beton. Die Bewehrung war an zahlreichen Stellen auf eng begrenztem Raum stark korrodiert. Alle diese Schäden ließen sich aber solchen Schwachstellen wie Rissen, Abstandshaltern oder zu geringer Betondeckung zuordnen. Unter ungestörtem Beton und bei ausreichender Überdeckung waren kaum Korrosionsschäden zu beobachten.

Ein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß und der Zahl der Schäden sowie der Salzzusammensetzung war nicht zu erkennen. Auch hier haben sich, wie in den Laborversuchen, keine gravierenden Unterschiede in der Korrosivität der Streusalze gezeigt.

Um zu illustrieren, wie weit der Korrosionsangriff an den betroffenen Stellen bereits fortgeschritten war, ist von den am stärksten korrodierten Stahlabschnitten ein metallographischer Schliff präpariert worden. Bild 72 zeigt diesen axial verlegten Längsschnitt durch drei Stähle. Die

korrosionsbedingte Querschnittsverringering der Stähle betrug nach diesem Bild bis zu ca. 50 %. Abschließend sei noch betont, daß es sich bei den induzierten Schwachstellen in den Betonplatten durchaus um solche Erscheinungen handelt, wie sie in der Baupraxis üblich sind.

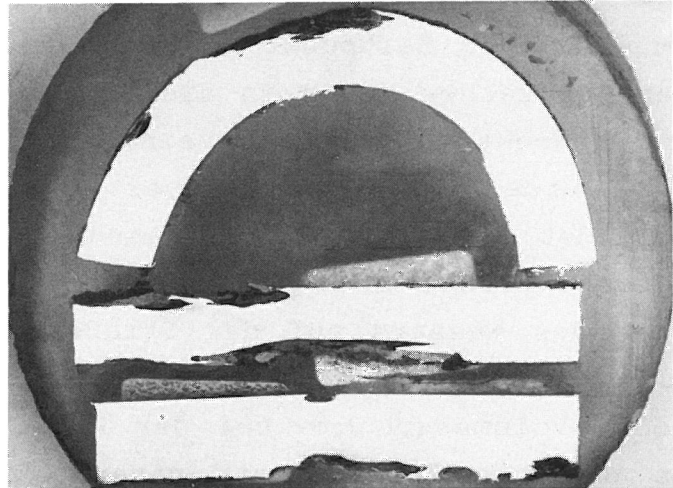


Bild 72  
Längsschliff durch Bewehrungsstähle mit  
korrosionsbedingter Querschnittsschwächung

An den zuletzt entnommenen Bordsteinproben sind auch an Stellen der Bewehrung Korrosionsangriffe beobachtet worden, die der Streusalzeinwirkung nicht direkt ausgesetzt waren. Sie befanden sich auf der dem Erdboden ausgesetzten Seite der Probekörper. Der Chloridgehalt des benachbarten Betons war so niedrig, daß eine chloridinduzierte Korrosion auszuschließen ist. Auf die Ursachen für diese Art der elementbedingten Korrosionsangriffe ist im Abschnitt 4 einleitend hingewiesen worden.

Ausgangspunkte für diese unprogrammgemäßen Korrosionsercheinungen waren wiederum die schon genannten korrosionschemischen "Schwachstellen" im Beton. Auch und erst recht in Gegenwart von hohen Chloridkonzentrationen werden Stähle an solchen Stellen bevorzugt korrodiert. Sie üben dann im Laufe der weiteren Beanspruchung einen korrosionsschützenden Einfluß auf die übrigen passiven Stahloberflächen aus. Diese bleiben auf diese Weise u. U. auch dann von einem Korrosionsangriff verschont, wenn das Chloridangebot an der Oberfläche für eine Depassivierung in ungeschütztem Zustand ausreichend hoch ist.

## 5 Einwirkung auf bituminöse Fahrbahnbeläge

### 5.1 Einleitung

Welchen Einfluß das Streuen mit Mischsalz auf die Beständigkeit der Fahrbahnbeläge aus Asphalt haben würde, war zum damaligen Zeitpunkt schwer einzuschätzen. Bei fachlichen Gesprächen wurde in diesem Zusammenhang immer wieder die Befürchtung geäußert, ein Zusatz von  $\text{CaCl}_2$  zum Tau-  
salz würde die Nutzungsdauer des Belages herabsetzen. Begründet wurde diese Auffassung insbesondere mit der Hygroskopizität des  $\text{CaCl}_2$ , die zu einer langen Verweildauer des Wassers auf der Straße und damit zu Bindemittelablösungen und Frostschäden führen würde sowie mit der großen Volumenzunahme bei der Kristallisation des Salzes aus der Lösung, die mit einer Sprengwirkung und damit einer Zerrüttung des Belages einhergeht. Ein weiterer Punkt für Skeptiker waren die möglichen Temperaturspannungen infolge Gefrierpunktniedrigung von maximal  $-55^\circ\text{C}$  und die damit verbundenen Beanspruchungen für den Belag. Zwar wußte man, daß solches Mischsalz gelegentlich auch in der Schweiz zum Einsatz gekommen war, doch gab es keine Untersuchungen, deren Ergebnisse zur Klärung der aufgeworfenen Fragen hätten beitragen können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden deshalb auch Versuche geplant, die das Ziel hatten, bereits vor einer allgemeinen Einführung dieses Streumittels, diesen Einfluß zu untersuchen. Insbesondere sollten die Mischsalzstreuung und die herkömmliche  $\text{NaCl}$ -Streuung im Hinblick auf ihre die Nutzungsdauer des Belages mindernde Wirkung miteinander verglichen werden, um eine Entscheidungshilfe für den zukünftigen Winterdienst auf Straßen zu erhalten.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe mußte der Verschleiß und die Festigkeit des Belages in Straßenabschnitten mit unterschiedlichen Streumethoden in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung gemessen und untereinander verglichen werden. Dabei sind neben den unterschiedlichen Streumethoden unter Umständen weitere Einflußparameter zu berücksichtigen gewesen. Der Verschleiß auf den Straßen setzt sich zusammen aus dem verkehrsbedingten Abrieb und einem Verwitterungsanteil. Seine Größe ist abhängig vom Zustand



der Straßenoberfläche, d.h. von der Art der Oberflächenbehandlung und von dem Alter der Oberflächenbehandlung, von der Beaufschlagung mit Tausalz und von der schmiergelnden Wirkung des zur Abstumpfung eingesetzten Granulates. Wie der Verschleiß wird auch die Festigkeit des Belages durch mehrere Faktoren beeinflusst. In erster Näherung sind es jedoch dieselben Faktoren wie beim Verschleiß, nämlich die Verkehrsbelastung und Witterungseinflüsse, die hier eine Rolle spielen. Sie führen auf lange Sicht gesehen zu einer Zerrüttung und Gefügelockerung des Belages insbesondere jedoch der oberflächennahen Bereiche und damit zu einer Festigkeitseinbuße des Belages. Die Zerrüttung führt im Laufe der Zeit zu einem verstärkten Verschleiß und der Verschleiß wiederum zu einem verstärkten Abtrag der geschwächten Bereiche. Beide Größen, Verschleiß und Festigkeit des Belages, stehen also in enger Beziehung zueinander. Insgesamt gesehen hängen also Verschleiß und Festigkeit des Belages in erster Linie ab von der Verkehrsbelastung, darüber hinaus sind aber auch folgende Parameter auf ihren Einfluß hin zu berücksichtigen:

- der Anfangszustand der Straßenoberfläche
- die klimatischen Beanspruchungen
- die Streumethode
- die Streumengen.

Um den Einfluß der Streumethoden herauszufiltern, mußten durch geschickte Versuchsplanung alle übrigen Einflußfaktoren möglichst konstant gehalten werden, damit bei einem Vergleich die Einflüsse eliminiert werden und nur der Einfluß der Streumethode hervortritt.

## 5.2 Stand der Untersuchungen

In zahlreichen Veröffentlichungen wird die Auffassung vertreten, daß Streusalze auf den bituminösen Belag chemisch keinen nachteiligen Einfluß haben (21, 23, 24 ). Dies beruht nach Auffassung der Verfasser auf der Eigenschaft, daß sowohl das Bitumen als auch die üblicherweise im Straßenbau verwendeten Gesteine beständig sind gegenüber den Lösungen von Chloriden. Umfangreiche Laborunter-

suchungen über den Einfluß von Auftausalzen auf die einzelnen Komponenten des bituminösen Mischgutes sowie auf das Mischgut selbst bestätigen diese Ansicht:

- Anhand der in (21) veröffentlichten Zahlen ist zu ersehen, daß die Beständigkeit von Bitumen gegenüber Chloridlösungen unabhängig von der Konzentration der Lösung bis zu Temperaturen von 65°C nachgewiesen worden ist. Da die Temperaturen der Asphaltbeläge diese Grenze i.d.R. nicht überschreiten, ist die Beständigkeit selbst im Sommer gewährleistet.
- W. Brand und V. Nies (22) kamen in einer Forschungsarbeit aus dem Jahre 1968 zu dem Schluß, daß Tausalz mit 97,59 Gew.% NaCl keinen Einfluß auf die Widerstandsfähigkeit gegen Schlag und Abrieb der von ihnen untersuchten Gesteinssplittte ausübt.
- Auch die Haftfestigkeit zwischen Bitumen und Gestein wird bei Anwesenheit einer Chloridlösung nicht schlechter eingestuft, als bei reinem Wasser (21, 23).
- In einer von R. Klein und G. Suß (22) durchgeführten Arbeit, bei der der Einfluß von NaCl-Auftausalzen auf die mechanischen Eigenschaften von Probekörpern aus Asphaltmischgut untersucht wurde, zeigten sich ebenfalls keine nachteiligen Auswirkungen auf das Stabilitätsverhalten der Probekörper. In der Regel wurde jedoch eine Volumenzunahme nach Frost-Tau-Wechsel Lagerung festgestellt.
- Schweizer Untersuchungen zur Einwirkung von  $\text{CaCl}_2$  auf Asphaltproben kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, daß bituminöse Deckschichtmaterialien keine sichtbaren Schäden und keine Druckfestigkeitsabnahme infolge Tausalz- und Frostbeanspruchung erfahren (24).

Keinesfalls darf aus all diesen Untersuchungen der Schluß gezogen werden, daß das Streusalz bei der Abnutzung der Asphaltbeläge nicht mitwirken würde. Der Grund für diese

Behauptung ist darin zu suchen, daß die gewählten Versuchsbedingungen nicht mit den realen Beanspruchungen übereinstimmen. Auf der Straße gibt es keine separate Wirkung des Streusalzes auf das Bindemittel, das Gestein oder das Mischgut allein. Die Beanspruchung setzt sich immer gleichzeitig aus allen Einflüssen, nämlich denen des Salzes, der Witterung und des Verkehrs zusammen. Aus diesem Grunde entstehen indirekte Auswirkungen des Salzes auf den Belag.

### 5.3 Anlegen von Versuchsfeldern, Verkehrsbelastung

Um die Wirkung von  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalz auf die Beständigkeit der Fahrbahnbeläge unter praxisgerechten Bedingungen beurteilen zu können, wurden ein Versuchs- und zwei Vergleichsfelder für notwendig erachtet. Wegen der zu geringen Verkehrsbelastung und der unzureichenden Vergleichbarkeit bezüglich der Querschnittsgestaltung konnten die von den Biologen im Hinblick auf das Begleitgrün der Straße bereits vorher ausgewählten Stellen nicht mitbenutzt werden. Es mußten vielmehr neue Felder ausgesucht werden. Maßgebend für die Wahl dieser Felder waren die folgenden Kriterien:

1. gleicher Schichtenaufbau der Straßenbefestigung,
2. vergleichbare Querschnittsgestaltung,
3. hohes Verkehrsaufkommen,
5. vergleichbare klimatische Bedingungen,
6. unterschiedliche Streumethoden.

Das eigentliche Versuchsfeld fand sich in Zehlendorf (Feld 2). Es wurde anhand der Streupläne der Berliner Stadtreinigung im Einvernehmen mit dem Tiefbauamt Zehlendorf in der Potsdamer Straße, Fahrtrichtung Stadtmitte, unmittelbar hinter der Einmündung Fischerhüttenstraße, angelegt. Im selben Straßenzug wurde auch das Vergleichsfeld mit  $\text{NaCl}$ -Streuung eingerichtet (Feld 3). Es wurde in die Potsdamer-Chaussee gelegt und zwar unmittelbar vor die Autowaschanlage "Cosy Wash" in der Nähe der Wannseebahn-Unterführung. Ein weiteres nicht mit Auftaumitteln bela-

stetes Vergleichsfeld wurde schließlich in der Yorckstraße in Kreuzberg gefunden (Feld 1). Die Einbeziehung dieses Feldes war möglich geworden, weil in diesem Bezirk seit dem Jahre 1980 ein weiterer Großversuch angelaufen war, der unter dem Schlagwort "Tausalzloser Winterdienst" allgemein bekannt geworden ist. Dieses Feld wurde während der gesamten Beobachtungszeit ohne Taumittel belassen und nur mit Schlackegranulat, einer sog. Bewag-Schlacke, abgestumpft.

Zeile	Feld Nr.	Bezeichnung	Streugut
	1	2	3
1	1	Yorckstraße (Kreuzberg)	ohne Tausalz (Granulat)
2	2	Potsdamer-/ Fischerhüt- tenstr. (Zehlend.)	CaCl <sub>2</sub> - Mischsalz
3	3	Potsdamer Chaussee/ Cosy Wash (Zehlend.)	NaCl

Tabelle 10  
Versuchsstrecken und Streumetho-  
den

Der Aufbau der Straßenbefestigung ist an allen drei Versuchsfeldern identisch. Er besteht von oben nach unten aus (siehe Bild 73):

- 4 cm Gußasphalt
- 3 cm Asphaltbinder 0/18
- 4 cm Asphaltbinder 0/25
- 15 cm bit. Tragschicht
- 12 cm Zementverfestigung

Darunter befindet sich der Untergrund, der vor dem Herstellen der Verfestigung auf 100% der einfachen Prodordichte verdichtet worden war. Damit sind die Straßenabschnitte in Bauklasse I entsprechend RSt075 bzw. "Standardausführung im Berliner Straßenbau, 1976" einzuordnen.

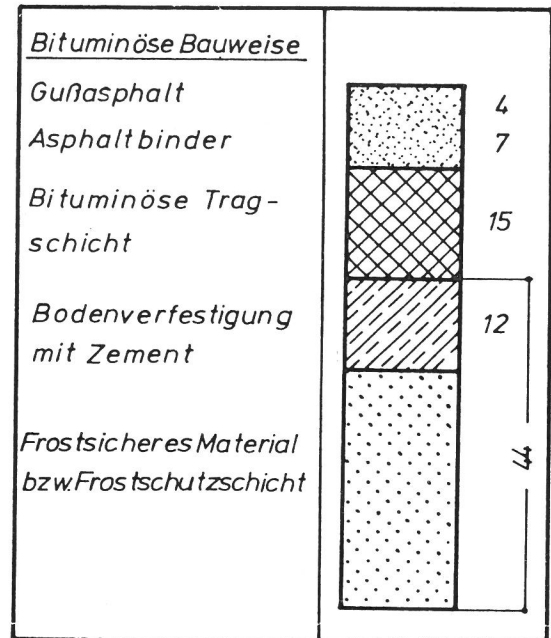


Bild 73  
Querschnittsgestaltung an den Versuchsfeldern 1 bis 3

Von der Funktion her gesehen, handelt es sich um Abschnitte von Richtungsfahrbahnen in Hauptverkehrsstraßen. Jede Richtungsfahrbahn besteht aus zwei Fahrstreifen und einem seitlich angeordneten Standstreifen. Die Gesamtbreite dieser drei Streifen schwankt zwischen 8,5 Meter und 10,0 Meter. Alle Felder sind in gleicher Weise angelegt worden. Sie sind jeweils drei Meter lang und reichen über die gesamte Breite einer Richtungsfahrbahn (siehe Bild 73a). Um vergleichbare Bedingungen zu erhalten, sind die Deckschichten der bestehenden Fahrbahnbefestigung abgefräst und durch einheitliche neue Gußasphaltschichten ersetzt worden. Der eingebaute Gußasphalt entsprach den einschlägigen Vorschriften über die Zusammensetzung und die Eigenschaften eines solchen Fahrbahnbelages. Als Stützkorn und als Abstreumaterial diente ein Diabassplitt.

Die im Beobachtungszeitraum aufgetretenen Verkehrsmengen und -lasten sind durch eine Erhebung des Senators für Stadtentwicklung und Umweltschutz festgestellt worden. Aufgrund dieser aus dem Jahre 1980 stammenden Zählung wurden für die Straßenabschnitte mit den drei Versuchsfeldern Verkehrsmengen zwischen 11000 und 19100 KFZ/24 Stunden mit LKW-Anteilen zwischen 3,6 und 7,4% ermittelt (siehe Tabelle 11). Nach Umrechnung auf Achslasten von 100 kN ergaben sich daraus die in Tabelle 11 für die drei Felder zusammengestellten, den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegten äquivalenten Achslastzahlen.

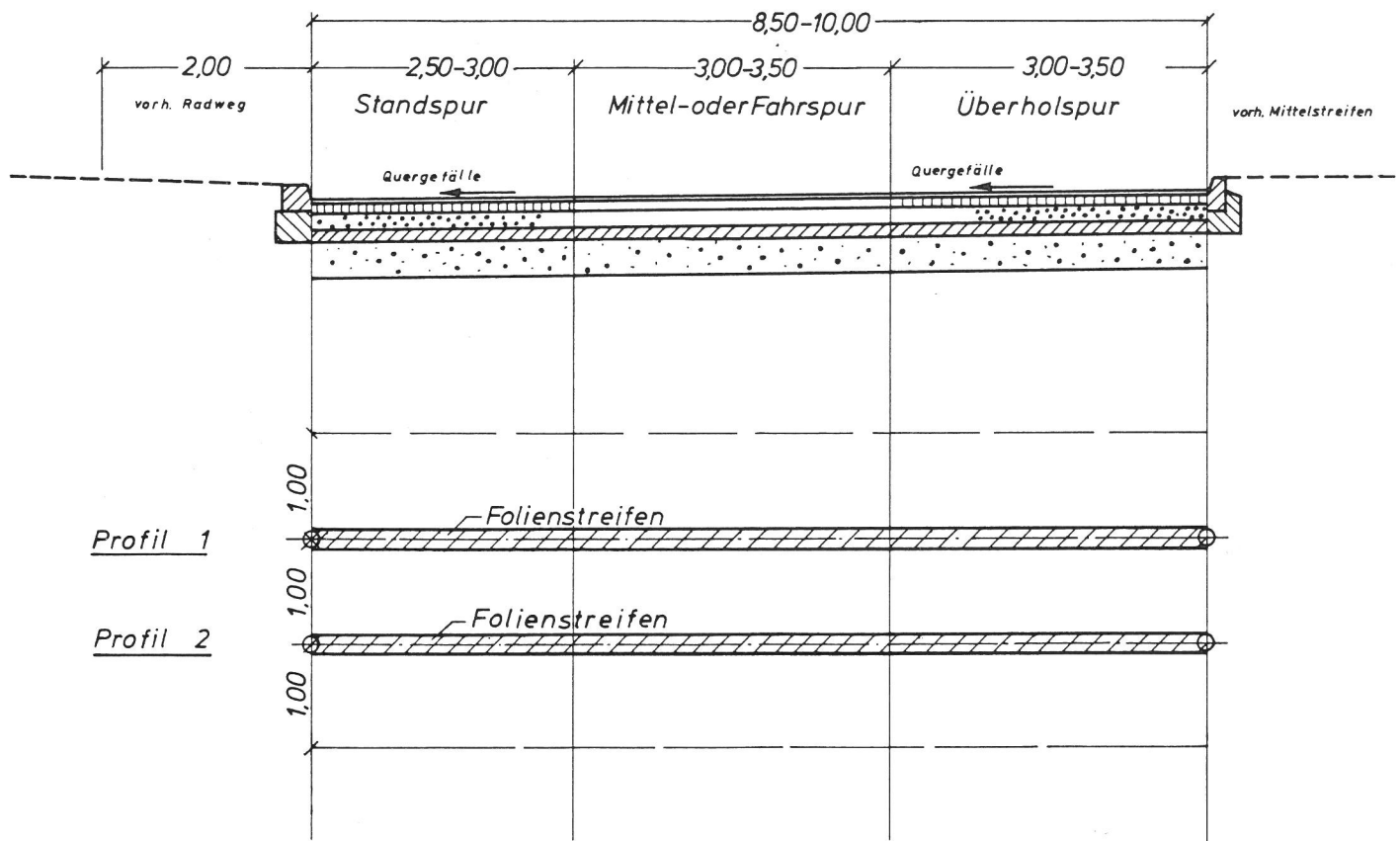


Bild 73a  
Aufbau der Straßenbefestigung in den Versuchsfeldern 1 bis 3

Zeile	Versuchsfeld	Verkehrsmenge KFZ/24 Std.	äquivalente Achslasten 100 kN-Achsen/Jahr
		(LKW-Anteil %)	
	1	2	3
1	Feld-Nr.1	19.100 (3,6)	$1,35 \cdot 10^5$
2	Feld-Nr.2	14.100 (6,3)	$1,62 \cdot 10^5$
3	Feld-Nr.3	11.000 (7,4)	$1,45 \cdot 10^5$

Tabelle 11  
Verkehrsmengen und Achslasten für  
die Felder 1 bis 3



## 5.4 Abschätzung und Bewertung der möglichen Einflußfaktoren

### 5.4.1 Abschätzen der Einflußgrößen

Nach dem Einbau der Deckschicht war die Oberfläche in den drei Versuchsfeldern frisch mit Splitt abgestreut. Da dieser Zustand erfahrungsgemäß zunächst einmal ziemlich uneinheitlich ist - loser Splitt, hervorstehende Spitzen - wurden die Felder vor Versuchsbeginn einen Monat lang dem Verkehr überlassen. Nach dieser Zeit waren die größten Unregelmäßigkeiten durch den überrollenden Verkehr weitgehend ausgebügelt und der Zustand der Straßenoberfläche vereinheitlicht worden. Der Versuch konnte beginnen. Die zu diesem Zeitpunkt gemessenen Rauhtiefen schwankten in den drei Versuchsfeldern zwischen 2,0 und 2,7 Millimetern. Die mit dem Skid-resistance tester (SRT) unter Zuhilfenahme des Ausflußmessers ermittelten Gleitreibungsbeiwerte am blockierten Schlepprad lagen über 0,42 bei  $V = 40 \text{ km/h}$ .

Um einen Eindruck von den Witterungsverhältnissen während des Versuchs zu vermitteln, wurden einige meteorologische Kenndaten aus der Beilage zur Berliner Wetterkarte zusammengetragen. Sie zeigen, daß die drei Versuchsjahre unterschiedlich einzustufen sind.

Tabelle 12  
Klimadaten für die Winter

Zeile	Winter	1980/81	1981/82	1982/83
	1	2	3	4
1	Eistage ( $\text{max. } 0^{\circ}\text{C}$ )	21	39	6
2	Frosttage ( $\text{min. } 0^{\circ}\text{C}$ )	82	90	57
3	Glatteistage	8	8	6
4	Reifglättetage	58	89	68
5	Schneefalltage	22	14	4

Trotz einer erheblichen Anzahl von Eis- und Frosttagen in den Wintern 1980/81 und 1981/82, waren die winterlichen Straßenverhältnisse innerhalb des Versuchszeitraumes rela-

tiv günstig. Insbesondere ließ sich der letzte Winter als ausgesprochen mild einstufen; er wies lediglich sechs Tage auf, an denen die Temperaturen nicht über 0°C anstiegen.

Im Sommer waren die klimatischen Beanspruchungen ebenfalls wechselhaft. Wie aus der oben zitierten Beilage zu ersehen war, handelte es sich bei dem Sommer 1981 um einen relativ kühlen Sommer mit unterdurchschnittlich vielen Sommer- und Tropentagen. Dagegen waren die beiden folgenden Sommer sehr warm. Insbesondere war der Sommer 1983 mit elf Tropentagen als ausgesprochen heiß einzustufen.

Zeile	Sommer	81	82	83
	1	2	3	4
1	Sommertage (Max: >25,0°C)	31	52	53
2	Heiße Tage (Max: >30°C)	3	7	11

Tabelle 13  
Klimadaten für die Sommer

Die Anzahl der heißen Tage (Tropentage) lag in diesem Jahr um fünf Tage höher als im vieljährigen Mittel.

Alle drei Felder befanden sich in Straßenzügen, die nach der Klassifizierung der Berliner Stadtreinigung der Streustufe 1 zuzuordnen sind. Die Streuung wurde maschinell mit Streufahrzeugen durchgeführt, die das Streugut über Drehteller auf der Straße verteilten. Die Streubreite betrug vier Meter. Als Streumittel kamen herkömmliches Streusalz auf NaCl-Basis, CaCl<sub>2</sub>-Mischsalz sowie beim tausalzlosen Winterdienst Schlacke-Granulat zum Einsatz.

Die Anzahl der täglich gefahrenen Streueinsätze richtete sich nach den Erfordernissen des Verkehrs und nach dem witterungsbedingten Zustand der Straßenoberfläche. Im Normalfall wurden ein bis zwei Streuungen je Einsatztag erforderlich, um den Verkehr aufrecht zu erhalten, wobei in der Regel eine am Vormittag und eine am Nachmittag durchgeführt wurden. Darüber hinaus kam es aber auch vor, daß bei extremer Winterglätte drei, vier und manchmal sogar fünf Streueinsätze je Tag gefahren werden mußten.

Die Streumenge je Einsatz war auf  $80 \text{ g/m}^2$  beim Salz bzw. auf  $180 \text{ g/m}^2$  beim Granulat limitiert worden.

Über die Anzahl der Einsatztage über die Jahre hinweg gibt eine Statistik der Berliner Stadtreinigungsbetriebe vom Oktober 1983 Auskunft, die hier auszugsweise wiedergegeben wird (Tabelle 14):

Tabelle 14  
Anzahl der Einsatztage

Zeile		80/81	81/82	82/87
	1	2	3	4
1	Einsatztage	86	102	62

Wegen der günstigen Witterungsverhältnisse im Winter waren die erforderlichen Streumengen, um die Straßen schnee- und eisfrei zu halten, zum Teil sehr gering. Nach den Angaben in den Streubüchern der Berliner Stadtreinigung bzw. nach eigenen Schätzungen betrugen die jährlichen Verbrauchsmengen bei der Salzstreuung zwischen  $1,4 \text{ m}^3/\text{km}$  im Winter 1982/83 und  $5 \text{ m}^3/\text{km}$  im Winter 1981/82. Beim tausalzlosen Winterdienst waren sie entsprechend höher (Tabelle 15).

Tabelle 15  
Streusalzmengen

Zeile	Streugut	Streumenge $\text{m}^3/\text{km}$		
		80/81	81/82	82/83
	1	2	3	4
1	NaCl	3,3	-	-
2	$\text{CaCl}_2$ -Mischsalz	4,0	~5	1,4
3	ohne Tausalz (Gran.)	~11	~15	~7

Aufgrund eines Beschlusses des Abgeordnetenhauses wurde in der Potsdamer Chaussee (Cosy Wash) seit dem Winter 81/82 nicht mehr mit NaCl gestreut, sondern nur noch mit Granulat abgestumpft. Dies hatte erhebliche Auswirkungen auf die Aussagefähigkeit der Untersuchungen insgesamt, wie später noch im Einzelnen erläutert werden wird.

#### 5.4.2 Bewertung der Einflußfaktoren

Es ist festzustellen, daß der Zustand der Straßen bezüglich der Beanspruchung durch Verkehr, Frost-Tauwechsel und Streumittel für bestimmte Wiederholungsbetrachtungen nicht reproduzierbar und auch nicht eindeutig beschreibbar ist. Die Straßenzustände sind vielmehr laufenden Veränderungen durch Witterungs-, Streumittel- und Verkehrseinflüsse unterworfen, so daß hier eine breite Palette von Einzelzuständen auftreten kann. Es hat sich deshalb als zweckmäßig erwiesen, vereinfachend den Zustand der Beläge als Funktion der Verkehrsbelastung anzusehen und als Parameter die unterschiedlichen Streumethoden einzuführen. Alle übrigen Einflußfaktoren sind von ihrer Bedeutung her gesehen vernachlässigbar, zumal auch ihr Einfluß durch die vergleichende Betrachtung weitgehend eliminiert wird. Dies trifft in erster Linie zu für den Zustand der Straßenoberfläche und die klimatischen Bedingungen, die bei allen drei Versuchsfeldern völlig identisch waren. Aber auch die jährlichen Streumengen sind, da sie sich jeweils an den Erfordernissen der Witterung und des Verkehrs orientierten, durchaus vergleichbar, wie ein Blick auf Tabelle 15 bestätigt.

#### 5.5 Untersuchungen

##### 5.5.1 Allgemeines

Der gesamte Versuch war für einen Zeitraum von drei Jahren geplant. Da die Probeentnahmen und Messungen nur mit erheblichen Verkehrseinschränkungen zu bewerkstelligen waren, entschlossen wir uns, die Untersuchungen auf wenige Termine zusammenzufassen. Es wurden pro Jahr zwei Messungen durchgeführt, eine im Herbst und eine im Frühjahr. Die Entnahme der Proben erfolgte jeweils im Anschluß an die Messungen im Herbst.

##### 5.5.2 Verschleißmessungen auf der Straße

Zur Messung des Verschleißes auf der Straße wurden in jedes Feld zwei Meßprofile gelegt. An jedem dieser Profile

wurde vor dem Einbau der Deckschicht eine 12,5 Zentimeter breite Aluminiumfolie in Querrichtung zur Fahrbahnachse auf die Oberfläche der freigelegten Binderschicht aufgebracht. Nach dem Einbau der Deckschicht wurde dann die Anfangsdicke der Deckschicht derart gemessen, daß mit einem elektrischen Schichtdickenmeßgerät (29) in Schritten von 20 Zentimetern der Abstand der Aluminiumfolie von der Deckschichtoberfläche bestimmt worden ist. Die Anfangsmessung fand einen Monat nach Einbau der Deckschicht, also vor der winterlichen Streuperiode 1980/81, statt. Am Ende der Streuperiode wurde im Frühjahr die Deckschichtdicke an allen Meßpunkten erneut gemessen und die Dickenabnahme aus der Differenz errechnet. Alle Messungen wurden über die gesamte Zeit hinweg in diesem Rhythmus durchgeführt.

Eine Nachkompression der Deckschichten unter dem Verkehr, die auch zu einer Dickenabnahme geführt hätte, brauchte nicht befürchtet zu werden, weil es sich um eine hohlraumfreie Gußasphaltschicht handelte.

#### 5.5.3 Festigkeitsuntersuchungen am Belag

Unmittelbar im Anschluß an die Verschleißmessungen im Herbst wurden je Versuchsfeld 9 Bohrkerne (Durchmesser 20 Zentimeter) aus der Befestigung herausgeschnitten. In jeder Spur befanden sich drei Entnahmestellen. In der Fahr- und Überholspur wurden die Entnahmestellen direkt in die Spurrinnen gelegt, um die höchste Beanspruchung der jeweiligen Spur erfassen zu können.

Mittels dieser Bohrkerne wurde die Biegezugfestigkeit des Belages nach verschiedenen Abnutzungsgraden, sprich Beobachtungszeiten, ermittelt. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit des Belages wurde in Anlehnung an das "Vorläufige Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (32) durchgeführt. Als Proben dienten prismatische Probekörper, die aus den Bohrkernen herausgeschnitten worden waren. Die so gewonnenen Probekörper hatten Querschnittsabmessungen von etwa 40 x 40 Millimeter. Sie wurden jeweils so beansprucht, daß die Oberseite der Deckschicht, also die beanspruchte Seite, in der Zug-

zone lag. Als maßgebende Größe wurde die maximale Biegezugfestigkeit bei Erreichen der Versprödungstemperatur angesehen (zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $10^{\circ}\text{C}$ ).

## 5.6 Darstellung der Ergebnisse

### 5.6.1 Verschleißmessungen

Die Ergebnisse einer elektrischen Schichtdickenmessung sind in Bild 74 exemplarisch dargestellt. Das Bild zeigt im oberen Teil die absolute Schichtdicke, d.h. den Abstand zwischen Aluminiumfolie und Oberfläche des Belages, über

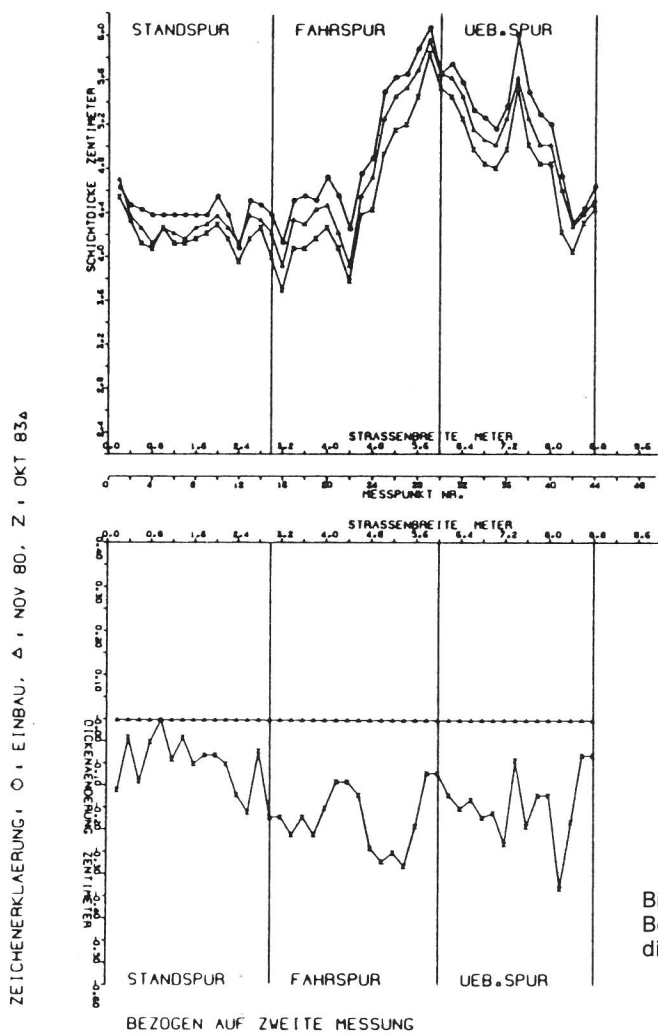


Bild 74  
Beispiel für die Auswertung einer Schichtdickenmessung (Feld 2)

der Fahrbahnbreite. Jede Kurve verbindet die zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelten Werte. Wie zu erkennen ist, wird die Schichtdicke von Messung zu Messung geringer. Im unteren Teil ist die Schichtdickenänderung zwischen der zweiten Messung (November 1980) und der letzten



Messung (Oktober 1983) aufgetragen, wobei die Werte der zweiten Messung als Bezugsebene benutzt wurden. Aus dieser Auftragung geht hervor, daß die Schichtdickenabnahme nicht an allen Stellen des Querschnittes gleich groß war. Es bildeten sich deutlich die Rollspuren heraus. An diesen Stellen war die größte Schichtdickenabnahme eingetreten. Die Maximalwerte an diesen Stellen betrugen nach dem ersten Jahr (entspricht ca.  $1,5 \cdot 10^5$  Übergänge einer 100 kN-Achslast) 1,6 Millimeter bei der Mischsalzstrecke bzw. 2,0 Millimeter bei der NaCl-Vergleichsstrecke. Im dritten Jahr, d.h. nach nunmehr ca.  $4,5 \cdot 10^5$  Achsübergängen, sank die Rate der maximalen Schichtdickenabnahme auf der Mischsalzstrecke auf 0,1 Millimeter ab. Ein entsprechender Wert für die NaCl-Vergleichsstrecke konnte wegen der Änderung der Streumethode nicht festgestellt werden.

Weitaus geringer waren jedoch die Schichtdickenänderungen an den Rändern der Richtungsfahrbahn und zwischen den Rollspuren.

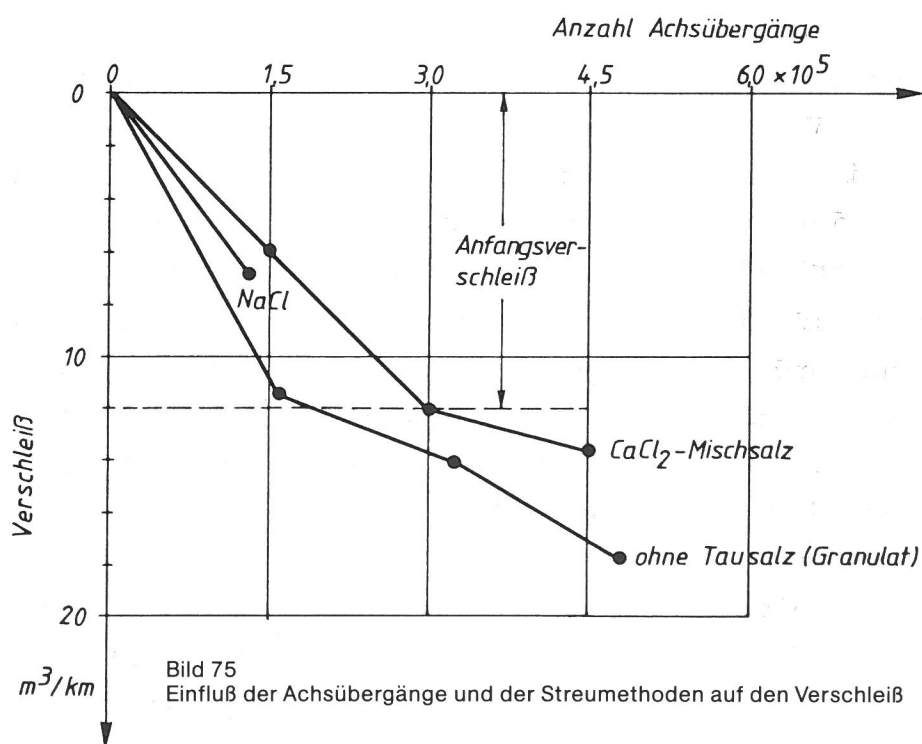
Um den Unterschied zwischen der Mischsalzstreuung und der herkömmlichen Streuung quantifizieren zu können, mußte entschieden werden, was als Verschleiß betrachtet werden soll.

Wie bereits von Schulze (30) in einer Arbeit über Straßenverschleiß erörtert wurde, gibt es mehrere Möglichkeiten für die Auswertung solcher Schichtdickenmessungen. Nach Abwägen aller Vor- und Nachteile haben wir uns dafür entschieden, in diesem Falle, wo es darauf ankommt die Beständigkeit des Belages gegenüber dem über die Fahrbahn gleichmäßig verteilten Streusalz zu untersuchen, die Betrachtungen auf die gesamte Fahrbahnbreite, d.h. Standspur, Fahrspur und Überholspur, auszudehnen und nicht nur die Maximalwerte an den hochbelasteten Stellen zu betrachten. Dadurch erhält man den Gesamtverschleiß, der sowohl die Bereiche mit partiell geringem Verschleiß als auch die Bereiche mit örtlich hohem Verschleiß beinhaltet. Diese Vorgehensweise hat u.a. auch den Vorteil, daß Verschiebungen im Belag sich nicht verfälschend auf das Ergebnis auswirken können. Eine Verdrückung an einer Stelle führt - Volumenkonstanz vorausgesetzt - zu einer

entsprechenden Aufwölbung an einer anderen Stelle und wird deshalb bei der integralen Erfassung des Gesamtverschleißes über die Breite der Richtungsfahrbahn nicht erfaßt. Aus diesem Grunde wurde der Verschleiß in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer bzw. der Anzahl der Achsübergänge mit Hilfe eines Rechenprogrammes, bei dem die Volumenänderung des Belages über die Fahrbahnbreite durch eine numerische Integration rechnerisch ermittelt wurde, bestimmt. Die Ergebnisse dieser Rechnung für die einzelnen Versuchsfelder mit unterschiedlichen Streumethoden sind in der Tabelle 16 zusammengefaßt und in Bild 75 grafisch dargestellt. Aus der Darstellung der Ergebnisse geht hervor, daß ebenso wie bei den Maximalwerten an den Rollspuren auch hier zunächst ein relativ hoher Anfangsverschleiß auftritt, der etwa in der Größenordnung von 11 bis 12 m<sup>3</sup>/km liegt und sich über einen Zeitraum von 1 bis 2

Zeile	Streumethode	Verschleiß m <sup>3</sup> /km nach Achsübergängen		
		1,5 · 10 <sup>5</sup>	3,0 · 10 <sup>5</sup>	4,5 · 10 <sup>5</sup>
	1	2	3	4
1	ohne Tausalz (Granulat)	11,6	14,1	17,7
2	CaCl <sub>2</sub> -Mischsalz	6,0	12,0	13,7
3	NaCl	6,9	—	—

Tabelle 16  
Verschleiß des Belages bei unterschiedlichen Streumethoden



Jahren (entsprechend 1,5 bis  $3 \cdot 10^5$  Übergänge einer 100 kN-Achse) erstreckt. Danach wird die jährliche Verschleißrate deutlich geringer. Sie fällt auf der Mischsalzstrecke auf  $1,7 \text{ m}^3/\text{km}$  und bei dem vergleichsweise betrachteten tausalzlosen Winterdienst in der Yorkstraße auf ca.  $3 \text{ m}^3/\text{km}$ . Der Vergleich zwischen Mischsalzstrecke und NaCl-Vergleichsstrecke ist wegen des Abbruchs der Salzstreuung auf der Potsdamer Straße sehr erschwert und eigentlich nur bezüglich des Anfangsverschleißes möglich. Letzterer ist bei der NaCl-Vergleichsstrecke geringfügig höher als bei der eigentlichen Versuchsstrecke mit  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalzstreuung. Der Wert für das erste Jahr liegt mit  $6,9 \text{ m}^3/\text{km}$  zwischen denen für  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalzstreuung und für den tausalzlosen Winterdienst mit Granulatstreuung.

#### 5.6.2 Festigkeit des Belages

Die am Anfang der Untersuchungen und dann jeweils nach Ablauf eines Jahres bzw. nach Übergang einer bestimmten Achslastzahl ermittelten Biegezugfestigkeitswerte sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Für die Auswertung sind

Zeile	Streumethode	Biegezugfestigkeit $\text{N/mm}^2$ nach Achsübergängen			
		$0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^5$
	1	2	3	4	5
1	ohne Tausalz (Granulat)	16,7	17,1	16,9	15,6
2	$\text{CaCl}_2$ -Mischsalz	15,1	15,5	14,3	13,4
3	NaCl	14,7	15,0	--	--

Tabelle 17  
Zeitfestigkeit des Belages bei unterschiedlichen Streumethoden

weniger die absoluten Werte interessant - sie schwanken je nach Zusammensetzung der Mischung für den Gußasphalt in gewissen Grenzen - als vielmehr die relativen Festigkeitswerte bezogen auf den Anfangswert. Aus diesem Grunde sind in Bild 76 die Werte Festigkeit/Anfangsfestigkeit

( $\sigma/\sigma_0$ ) in Abhängigkeit von der Anzahl der Übergänge einer 100 kN-Achse dargestellt. Bei dieser Auftragung kommt, da der verstärkte Abrieb infolge des Granulates für die Festigkeit keine Rolle spielt, der Einfluß des Streusalzes deutlich zum Ausdruck. So ist der Festigkeitsabfall nach  $3 \cdot 10^5$  Achsübergängen und mehr bei der Mischsalzstreuung steiler als beim tausalzlosen Winterdienst. Die Festigkeit fällt nach  $4,5 \cdot 10^5$  Achsübergängen ohne Tausalzwirkung um ca. 5 % auf 95 % ihres Anfangswertes und bei der Mischsalzstreuung nach derselben Dauerbeanspruchung auf ca. 90 % ihres ursprünglichen Wertes. Der zwischenzeitliche Anstieg aller Festigkeitswerte ist durch eine Versprödung des Bindemittels in den oberflächennahen Schichten zu erklären. Unter Umständen spielen hier auch gewisse Gefügelumlagerungen infolge der äußeren Belastung eine Rolle.

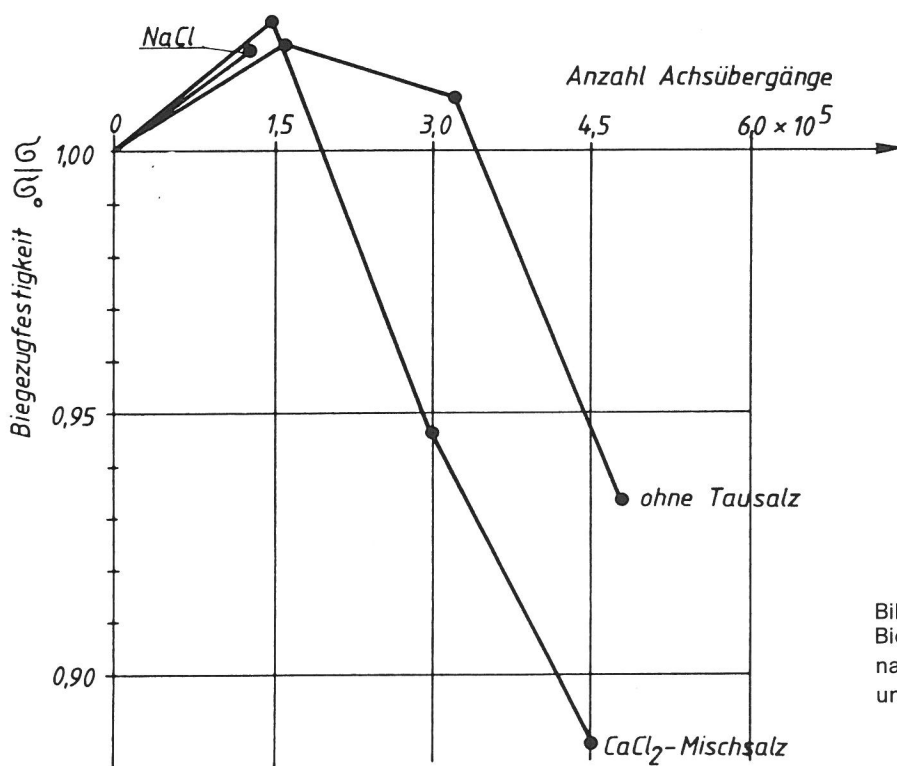


Bild 76  
Biegezugfestigkeit des Belages  
nach Verkehrsbelastung bei  
unterschiedlichen Streumethoden

## 5.7 Interpretation der Ergebnisse

Gegenstand der Untersuchungen über die Beständigkeit von Fahrbahnbelägen aus Asphalt gegen  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalz waren jungfräuliche Beläge aus Gußasphalt mit einer Abstreuerung aus Diabasplitt. Diese Beläge wurden über drei Jahre hinweg bezüglich ihres Verhaltens unter Verkehr, Witterung

und Streusalzeinfluß beobachtet. Dabei wurde festgestellt, daß die Abnutzung des Belages im wesentlichen in zwei Phasen abläuft, einer Anfangsphase und einer mehr oder weniger stationären Phase. Die Abnutzung des Belages war in den ersten ein bis zwei Jahren im wesentlichen auf den Abtrag des Abstreusplittes beschränkt. Erst im darauffolgenden Jahr wurden dann mehr und mehr der bituminöse Mörtel und die oben eingebetteten Splittkörner in den Verschleiß einbezogen. Der Abtrag hatte, wie die Untersuchungen gezeigt haben, mit steigender Anzahl an Achsübergängen insgesamt gesehen abnehmende Tendenz, d.h. am Anfang war der Abtrag groß, nahm dann im Laufe der Nutzungsdauer ab und näherte sich schließlich asymptotisch einem stetig abnehmenden Endwert. Dabei betrug der Anfangsverschleiß insgesamt etwa 10 bis 12 m<sup>3</sup>/km und verteilte sich auf einen Zeitraum von 1 bis 2 Jahren (entsprechend 1,5 bis 3·10<sup>5</sup> Übergänge ein 100 kN-Achslast). Danach war der Abstreusplitt soweit abgefahren, daß der Verschleiß auf den bituminösen Mörtel und die Splittkörner der Asphaltmasse ausgedehnt wurde. Es folgte die stationäre Phase des Verschleißes. Der Übergang von Anfangsverschleiß in den stationären Verschleiß erfolgte ohne Tausalzbeaufschlagung schneller als mit Tausalz. Die Ursache ist in der schmiergelnden Wirkung des Granulates zu suchen; alle Unebenheiten wurden zunächst erst einmal mit Hilfe des Schmiergels abgeschliffen. Die sich dann einstellende stationäre Verschleißrate war beim CaCl<sub>2</sub>-Mischsalz mit 1,7 m<sup>3</sup>/km geringer als beim tausalzlosen Winterdienst. Dort betrug sie nämlich ungefähr 3 m<sup>3</sup>/km. Direkte Vergleiche mit der NaCl-Streumethode ließen sich nicht anstellen, da der Versuch nicht in der geplanten Weise durchgeführt werden konnte. Untersuchungen von Pump (34) ergaben für NaCl eine stationäre Schichtdickenabnahme in den Rollspuren von 0,3 Millimeter pro Jahr. Vergleicht man diesen Wert mit dem entsprechenden Wert für die CaCl<sub>2</sub>-Mischsalzstreuung von 0,1 Millimeter pro Jahr, so kann man feststellen, daß NaCl etwas höhere Maximalwerte des Verschleißes bewirken kann als CaCl<sub>2</sub>-Mischsalz. Die Unterschiede sind allerdings gering, zumal man den Werten eine gewisse Schwankungsbreite zugestehen muß. Der Verschleiß wird durch Splittkornausbrüche, Kornzerkleinerungen und

Mörtelverluste an der Belagsoberfläche erzeugt. Um den Zerstörungsgrad beurteilen zu können, wurden die entnommenen Bohrkernproben aus den drei Versuchsfeldern bezüglich ihrer Oberflächenbeschaffenheit untersucht. In dem Vergleichsfeld Nr. 1 ohne Tausalzbeaufschlagung waren die befahrenen Bereiche der Belagsoberfläche bereits nach einem Jahr durch eine Vielzahl von Kornausbrüchen gekennzeichnet. Aus dem ursprünglich "geschlossenen" Saum von Abstreusplitt war eine Vielzahl von Körnern durch die Beanspruchung ausgebrochen worden; es klafften Löcher. Nach und nach wurden die stehengebliebenen Splittkörner abgeschliffen und der oberflächlich freiliegende Mörtel ausgekratzt. Am Ende des Versuchs war eine narbige Belagsoberfläche übriggeblieben, aus der vereinzelt abgeschliffene Splittkörner herausragten. Die Oberfläche wirkte ruppig. Die befahrenen Bereiche im Versuchsfeld Nr. 2 mit  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalzstreuung zeigten hingegen ein anderes Aussehen. Am Ende des ersten Jahres, d.h. nach Übergang von ca.  $1,5 \cdot 10^5$  Achslasten von 100 kN, wirkte die Oberfläche immer noch "geschlossen". Der Abstreusplitt war im wesentlichen komplett geblieben, obwohl die einzelnen Körner des Abstreusplitts weitgehend durch Kantenabbrüche, Kornzerteilung und Abschleiß abgemagert waren. Dieses Erscheinungsbild setzte sich im zweiten Jahr unter ständiger Zerkleinerung des Abstreusplitts fort bis schließlich gegen Ende des Versuches die Mörteloberfläche zutage trat. Die Oberfläche wirkte glatt. Die Rollspuren im Vergleichsfeld Nr. 3 zeigten nach einem Jahr Verkehr, Verwitterung und NaCl-Beaufschlagung noch einen "geschlossenen" Saum mit Abstreusplitt, der allerdings auf der Überholspur infolge Kornausbruch teilweise durchlöchert war. Der Grund für die verstärkt aufgetretenen Splittkornausbrüche und Mörtelverluste im Vergleichsfeld Nr. 2 sind auf die Verkehrsbeanspruchung insbesondere in Verbindung mit dem Granulat zu suchen. Dieses wirkte als Schmiergel und trug dazu bei, besonders am Anfang, als noch viele kleine Unebenheiten auf der Belagsoberfläche vorhanden waren, den Abrieb zu erhöhen. Die Beanspruchung ähnelte im wesentlichen der, die früher durch Spikes verursacht worden war und die gekennzeichnet war durch das Auskratzen des Mörtels im Winter und das Abschleifen der hervorste-

henden Splittkörner im Sommer. Daneben spielte aber auch die Frosttausalzbeanspruchung eine wichtige Rolle für den Verschleiß. Wie aus den Versuchen zu erkennen ist, führt sie in erster Linie zur beschleunigten Kornzerkleinerung und zum Ausfrieren des in den Mörtel eingebundenen Abstreusplittes. Die Gußasphaltmasse selbst ist wegen des hohen Bindemittelanteils und ihrer Zusammensetzung von Hause aus relativ dicht, so daß kaum Wasser oder Lösung in das Innere eindringen kann. Lediglich an der Oberfläche ist ein Vordringen über Poren, Kanülen und Risse möglich. Dieses führte auch zu merklichen Quellerscheinungen im Winter. So kam es vor, daß im Frühjahr eine größere Schichtdicke gemessen wurde als im vorangegangenen Herbst, obwohl in der Zwischenzeit ein Verschleiß stattgefunden haben mußte. Das wiederholte Hervortreten dieses Effektes ist möglicherweise auf den Anteil an Trinidad-Epure zurückzuführen, der bei der eingebauten Gußasphaltmasse 30 Gew.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt, ausmachte. Trinidad-Asphalt besitzt ein relativ hohes Wasseraufnahmevermögen (38).

Darüber hinaus wurde auch die Festigkeit des Belages beeinflusst. Die Festigkeit eines Fahrbahnbelages aus Asphalt ist infolge der häufigen Wiederholung von Be- und Entlastungen keine konstante Größe. Sie nimmt vielmehr mit der Häufigkeit der Beanspruchungen laufend ab und nähert sich schließlich einem konstanten Endwert, der sogenannten Dauerfestigkeit. Das Maß der Abnahme der Festigkeit in der Anfangszeit der Dauerbeanspruchung hängt auch ab von der Beaufschlagung mit Tausalz. Aus den ermittelten Festigkeitswerten ist in der Tendenz zu erkennen, daß bei Dauerbeanspruchung in Gegenwart von Mischsalz die Festigkeit des Belages stärker herabgesetzt wird als bei Belägen ohne Tausalzbeaufschlagung. Nach etwa  $4,5 \cdot 10^5$  Achsübergängen einer 100 kN-Achslast sinkt die Biegezugfestigkeit auf ca. 90 % ihres Anfangswertes, während die Abnahme ohne Tausalz etwa nur 5 % ausmacht. Allerdings sind die Unterschiede innerhalb dieses Zeitraumes noch gering. Unterschiede zwischen der  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalzbeaufschlagung und der NaCl-Streuung konnten wegen des Abbruchs der NaCl-Streuung nach einem Jahr noch nicht festgestellt werden. Die Abnahme der Festigkeit und der gleichzeitige Verschleiß hatten



eine Herabsetzung der zulässigen Biegebeanspruchung des Belages zur Folge. Die zulässige Biegebeanspruchung sank während der Versuchszeit, d.h. nach ca.  $4,5 \cdot 10^5$  Achsübergängen, bei  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalzbeaufschlagung auf 76 % und ohne Tausalzbeanspruchung auf 80 %.

#### 5.8 Schlußfolgerungen, Zusammenfassung

Wie bei den durchgeführten Feldversuchen festgestellt werden konnte, ist  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalz in der Lage, den durch die Dauerbeanspruchung unter Verkehr, Witterung und anderer Einflüsse auftretenden zeitlichen Festigkeitsabfall des Belages zu beschleunigen. Innerhalb des Versuchszeitraumes von 3 Jahren, das entsprach einer Belastung von  $4,5 \cdot 10^5$  Übergängen einer 100 kN-Achslast, sank die Festigkeit bei  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalzbeaufschlagung auf 90 % ihres Anfangswertes und ist damit um ca. 5 % niedriger als der Vergleichswert für den tausalzlosen Winterdienst.

Ein Vergleich mit der NaCl-Streumethode ist wegen des Abbruchs der Streuung nach einem Jahr nicht möglich gewesen.

Der durch die Beanspruchung gleichzeitig eingetretene Verschleiß der Beläge ist beim Streuen mit  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalz geringer einzustufen als bei der herkömmlichen Streumethode mit NaCl. Er betrug in der für die Lebensdauer der Beläge letztlich maßgebenden stationären Verschleißphase  $1,7 \text{ m}^3/\text{km}$ , während er beim herkömmlichen Streusalz vermutlich unter  $3 \text{ m}^3/\text{km}$  aber über  $1,7 \text{ m}^3/\text{km}$  gelegen haben dürfte. Eine genaue Angabe dieses Wertes ist ebenfalls wegen des Abbruchs der NaCl-Streuung nach dem ersten Jahr nicht möglich. Aufgrund dieser Zahlenrelation kann man annehmen, daß die Umstellung von NaCl auf  $\text{CaCl}_2$ -Mischsalz keine negativen Auswirkungen auf das Verschleißverhalten der Fahrbahnbeläge aus Asphalt haben dürfte.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann deshalb festgestellt werden, daß Mischsalz aus 80 % NaCl und 20 %  $\text{CaCl}_2$  in seiner Wirkung auf den Fahrbahnbelag aus Gußasphalt - einer Bauweise, die für Berliner Stadtstraßen typisch ist - mit den zur Zeit üblichen Streumitteln bzw. Streumethoden in etwa gleichzusetzen ist, es treten keine gravierenden Unterschiede auf.

## 6 Zusammenfassung

Der seit vielen Wintern übliche Einsatz von Auftaumitteln zur Glättebekämpfung auf den Straßen hat zu Korrosionsschäden geführt, die insbesondere bei Verkehrsbauwerken wie z. B. Brücken bedeutende Auswirkungen haben. Bei der Erprobung eines Mischsalzes, das als umweltfreundlicher als das vorwiegend eingesetzte Steinsalz (NaCl) eingestuft wird, stellte sich die Aufgabe, dessen Wirkung auf Beton und Stahlbeton sowie auf bituminöse Fahrbahnbeläge vergleichend zu untersuchen.

In Laborversuchen wurde den Transportvorgängen, besonders hinsichtlich des Chloridions, im Beton unter definierten Bedingungen nachgegangen. Da Beton stets Kapillarporen enthält, galt eine Versuchsreihe dem kapillaren Aufsaugen verschiedener Salzlösungen. Danach nimmt das kapillare Saugvermögen mit zunehmender Chloridkonzentration ab, wobei die Salzart nur geringen Einfluß hat; lediglich bei niedriger NaCl-Konzentration wird ein erhöhtes Saugvermögen festgestellt. Die Chloriddiffusion dagegen wird infolge des Calciumchloridanteils im Mischsalz erwartungsgemäß beschleunigt, der Diffusionskoeffizient ist etwas höher als bei gleichartiger NaCl-Einwirkung. Dem entsprechen in weiteren Versuchen gefundene deutlichere Mineralumwandlungen infolge Chloridaufnahme; vor allem der Abbau von Calciumhydroxid bei ständiger Beanspruchung durch Lösungen macht sich beim Mischsalz stärker bemerkbar als beim Natriumchlorid. Die Unterschiede in der Wirkung der beiden Salzarten sind zwar i. a. gering, doch zeigen sich bei einzelnen Eigenschaften als Folge der Kombination verschiedenster Einflüsse auch größere Differenzen. So nimmt die Festigkeit von dauernd in Mischsalzlösung gelagerten Zementmörteln schneller ab als in NaCl-Lösung. Allerdings muß darauf hingewiesen werden, daß hier die ermittelte Festigkeitseinbuße allein nicht als standsicherheitsgefährdend für Betonbauwerke angesehen werden darf.

Weitere Laborversuche befaßten sich mit der kombinierten Einwirkung von Tausalzlösungen und Frosttauwechseln. Beide Salzarten wirken unter den gewählten Bedingungen gleicher-

maßen zerstörend; beim Mischsalz zeichnet sich lediglich eine leichte Verzögerung des anfänglichen Schadensverlaufs ab. Beim Aufstreuen des Mischsalzes auf Eisschichten auf Beton wird der vom NaCl bekannte "Temperaturschock", d. h. plötzliches Absinken der Betontemperatur durch Entzug von Schmelz- und Lösungswärme, deutlich gemildert, da der  $\text{CaCl}_2$ -Anteil Lösungswärme freisetzt.

An mit üblichem Betonstahl bewehrten Platten unterschiedlicher Betonqualität wurden Freilandversuche über 3 Jahre durchgeführt. Während der Winterperioden wurden die Platten bei entsprechender Witterung werktäglich bis zu dreimal mit Mischsalz bzw. herkömmlichem Streusalz bestreut. Die Streumenge betrug einheitlich  $40 \text{ g/m}^2$ . Die Gesamtbelastung war derjenigen vergleichbar, der Bundesautobahnen in strengen Wintern durchschnittlich unterliegen. Nach Abschluß der Versuche erfolgten u. a. Chloridgehaltsbestimmungen und Beurteilungen der freigelegten Bewehrung. Die Chloridgehalte hatten im Bereich der Bewehrung in den meisten Fällen den als unbedenklich angesehenen Höchstwert von 0,4 %, bezogen auf den Zementanteil, überschritten. Maximalwerte von mehr als 2 % wurden ermittelt. Dennoch war eine großflächige Korrosion der Bewehrung nicht festzustellen. Vielmehr traten starke Korrosionserscheinungen punktuell vorzugsweise im Eckenbereich der Platten sowie unter Abstandshaltern, unabhängig vom lokalen Chloridgehalt, auf. Unterschiede zwischen den Salzarten ließen sich nicht quantifizieren. Qualitativ war zu bemerken, daß die mit Mischsalz bestreuten Oberflächen meist geringere  $\text{Cl}^-$ -Gehalte aufwiesen als die mit NaCl beaufschlagten. Bei diesen Versuchen zeichnete sich sehr deutlich der eminente Einfluß der Betonzusammensetzung auf Chloridaufnahme und Bewehrungskorrosion ab. Als weiteres Ergebnis von praktischem Interesse ist die Zunahme der Chloridkonzentration zur Plattenunterseite hin hervorzuheben.

Die ursprünglich im Mittelpunkt des Vorhabens stehenden Feldversuche zur Einwirkung der Salze auf Betonproben wurden durch die eingeschränkte Streupraxis nach dem ersten Versuchsjahr in ihrer Bedeutung gemindert, führten jedoch noch zu einigen interessanten Ergebnissen. Bewehrte Betonproben unterschiedlicher Qualität in Form von Bordsteinen

und Gehwegplatten wurden am Fahrbahnrand von Stadtstraßen eingebaut, die mit Mischsalz bzw. NaCl bzw. nur abstumpfend bestreut wurden. Jeweils nach einer und drei Winterperioden wurde ein Teil der Proben entnommen und im Labor u. a. auf Chloridgehalt und Bewehrungskorrosion geprüft. Die Chloridaufnahme der Außenschichten war zwar eindeutig den Parametern Zeit und Betonqualität zuzuordnen, blieb aber im Bereich der Bewehrung deutlich unter dem Grenzwert von 0,4 %. Auch hier zeigten sich in der äußersten Schicht tendenziell etwas geringere Werte bei den Mischsalzproben als bei den von NaCl beanspruchten, was einen gewissen Auswaschungsprozeß durch Niederschläge vermuten läßt. Von Interesse dürfte die zwar geringe, doch deutlich nachweisbare Chloridaufnahme der Proben an der nicht mit Salz bestreuten Versuchsstrecke sein. Insgesamt spiegelten die Freiland- und Feldversuche nicht die in den Laborversuchen gefundene geringfügig stärkere Wirkung des Mischsalzes gegenüber herkömmlichem Streusalz wider. Allerdings ist hierbei der für Feldversuche zu kurze Beanspruchungszeitraum in die Bewertung einzubeziehen.

Ergänzend zu den Auslagerungsversuchen unter Praxisbedingungen sind Korrosionsprüfungen in Form von Dauertauchversuchen und elektrochemischen Messungen im Labor durchgeführt worden. Dabei wurden ungeschützte und mörtelummantelte Bleche aus unlegiertem Stahl chloridhaltigen Lösungen ausgesetzt. Die Versuchsbedingungen waren den in der Praxis zu erwartenden Korrosionsbedingungen einer tausalzbeanspruchten Stahlbewehrung angepaßt.

Sowohl die Tauchversuche als auch die Potentialmessungen haben bestätigt, daß Chloride die korrosionsschützende Wirkung zementgebundener Baustoffe gegenüber Stahl grundsätzlich zunichte machen und den Korrosionsangriff fördern. Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, daß dieser schädliche Einfluß nahezu unabhängig von der eingesetzten Salzart ist.

Ein weiteres Teilprojekt hatte das Ziel, die Schädigung von Asphalt-Fahrbahnbelägen auf Stadtstraßen durch die Salzstreuungen im Vergleich zur Granulatstreuung zu unter-

suchen. Der Vergleich wurde praxisnah in Versuchsfeldern ebenfalls über drei Jahre hinweg geführt; parallel dazu wurden Laborversuche durchgeführt. Da für das Versagen einer Deckschicht im allgemeinen Biegespannungen verantwortlich sind, wurde das aufnehmbare Biegemoment der Deckschicht als Maß für die Beurteilung herangezogen. Die Änderung des aufnehmbaren Biegemomentes macht deutlich, welchen Einfluß die Zerrüttung des Belages und der Verschleiß auf die Beanspruchbarkeit einer Deckschicht haben. Bei einfacher Biegung ist nämlich das Biegemoment, das die Deckschicht aufnehmen kann, abhängig von der Biegefestigkeit und der Dicke des Belages, d. h. das aufnehmbare Biegemoment  $M_Y$  wächst mit der Biegezugfestigkeit  $\sigma_{BZ}$  und mit dem Quadrat der Dicke  $h$ . Je geringer die Biegezugfestigkeit und umso dünner die Schicht, desto geringer ist das aufnehmbare Moment. Mit anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies: wenn die Streugutbeanspruchung infolge Abrieb und Abwitterung zu einem Substanzverlust der Deckschicht führt, so macht sich diese Erscheinung in einer Verminderung der Schichtdicke bemerkbar. Gleichzeitig kann diese Beanspruchung aber auch zu einer Festigkeitseinbuße der restlichen Deckschichtmasse führen, wie z. B. durch Gefügelockerung und Quellung der Asphaltmasse, so daß sich beide Effekte überlagern. Die gesamte Schädigung wird durch die Verminderung des aufnehmbaren Biegemomentes der Deckschicht, also die zur Beobachtungszeit noch vorhandene Beanspruchbarkeit der Deckschicht, charakterisiert. Durch Einführen dieses Bewertungsmaßes ist es also möglich, Streumittel bzw. Streumethoden mit unterschiedlicher Einwirkung auf Substanzverlust und Festigkeit miteinander zu vergleichen.

Entgegen der ursprünglichen Planung wurden innerhalb der NaCl-Vergleichsstrecke nach Ablauf eines Jahres die Streuungen eingestellt und somit die dortigen Messungen gegenstandslos. Die im Untersuchungszeitraum in den übrigen Rollspuren der Überholspuren festgestellten Schichtdicken zeigten bei allen drei Strecken im Laufe der Zeit abnehmende Tendenz. Die jährlichen Abnahmeraten unterschieden sich jedoch im einzelnen zum Teil sehr deutlich. So betrug die Schichtdickenabnahme innerhalb der Versuchsstrecke mit Mischsalz nach einem Jahr maximal 1,6 Millimeter. Im sel-

ben Zeitraum nahm die Schichtdicke bei der Granulatstreuung um 2,0 Millimeter und in der NaCl-Vergleichsstrecke um 2,9 Millimeter ab. In den folgenden beiden Jahren waren die Schichtdickenraten geringer. Bei der Mischsalzversuchsstrecke fielen sie auf 1,2 Millimeter im zweiten Jahr und - wegen der äußerst geringen Streumengen - schließlich auf 0,1 Millimeter im dritten Jahr, während bei der Granulat-Vergleichsstrecke nach einem Jahr ohne jegliche Schichtdickenänderung am Ende der Beobachtungszeit wieder eine Schichtdickenrate von 1,4 Millimeter pro Jahr gemessen wurde.

Die im selben Zeitraum festgestellten Veränderungen bei der Biegezugfestigkeit der Deckschicht stellten sich dagegen wie folgt dar: Während bei der Vergleichsstrecke mit Granulatstreuung innerhalb von drei Jahren ein stetiger Festigkeitsabfall zu verzeichnen war, konnte sowohl bei der Mischsalzstrecke als auch bei der NaCl-Vergleichsstrecke zunächst ein geringfügiger Anstieg der Festigkeit festgestellt werden, der bei der Mischsalzstrecke später in eine deutliche Festigkeitsabnahme überging. Die Biegezugfestigkeit verringerte sich in dieser Zeit von 15,1 auf 13,4 N/mm<sup>2</sup> auf der Mischsalzstrecke. Die entsprechende Festigkeitswerte für die Granulatstreuung lauteten 17,4 und 15,6 N/mm<sup>2</sup>.

Insgesamt trat somit durch Tausalzlösungen infolge Streuens mit Mischsalz eine kontinuierliche Schädigung des Belages ein, so daß die Beanspruchbarkeit innerhalb von drei Jahren auf 76 Prozent abfiel.

Ein Vergleich zwischen den beiden Salzarten war wegen des Abbruchs der NaCl-Streuung nach dem ersten Jahr nur bedingt möglich. Unmittelbar nach dem Abbruch war die festgestellte Beanspruchbarkeit der Deckschicht auf der Mischsalzstrecke mit 94 Prozent etwas höher als auf der Vergleichsstrecke mit NaCl-Streuung, wo die Beanspruchbarkeit bereits auf 90 Prozent abgesunken war. Der weitere Verlauf der Schädigung kann nur tendenziell abgeschätzt werden. Da die parallel durchgeführten Lagerungsversuche für das Mischsalz geringfügig größere Festigkeitseinbußen hervorgebracht haben, ist zu erwarten, daß sich der

Verlauf der Beanspruchbarkeiten der beiden Deckschichten wieder angenähert hätte und somit innerhalb des betrachteten Zeitraumes vermutlich kaum Unterschiede aufgetreten wären.

Ebenfalls gering sind die Unterschiede zur vergleichsweise betrachteten Schlacke-Granulat-Streumethode: Obwohl die Schichtdickeabnahme und der Festigkeitsabfall zeitlich unterschiedlich verlaufen, hatten beide Strecken dennoch einen kontinuierlichen Verlauf der Beanspruchbarkeit zu verzeichnen. Nach drei Jahren Liegedauer war die Beanspruchbarkeit nach Mischsalzstreuung etwa ebenso weit abgesunken wie die Beanspruchbarkeit nach dem tausalzlosen Winterdienst.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann deshalb festgestellt werden, daß das Mischsalz aus 80 % NaCl und 20 % CaCl in seiner schädigenden Wirkung auf den Fahrbahnbelag aus Gußasphalt - einer Bauweise, die für Berliner Stadtstraßen typisch ist -, mit den zur Zeit üblichen Streumitteln bzw. Streumethoden in etwa gleichzusetzen ist; es treten keine gravierenden Unterschiede auf. Eine Minderung der Schadwirkung durch den Einsatz von Mischsalz ist für die Fahrbahnbeläge aus Asphalt jedoch ebenso wenig wie für Stahlbetonbauwerke zu erwarten.



## 7 Literaturverzeichnis

- (1) Gonnerman, H. F.; Timms, A. G.; Taylor, T. G.:  
Effect of calcium and sodium chlorides on concrete  
when used for ice removal. Proc. Amer. Concr. Inst.  
33, S. 107 - 122 (1936)
- (2) Walz, K.: Die Einwirkung von Streusalzen auf Beton.  
Straßenbau-Jahrbuch 1939/1940, S. 231 - 244, (1940)
- (3) Rösli, A.; Harnik, A. B.: Zur Frost-Tausalz-Bestän-  
digkeit von Beton. Schwizer Ingenieur und Architekt  
46, S. 1 - 6 (1979)
- (4) Lyse, I.: Deterioration of concrete brine storage  
tanks. Proc. Amer. Concr. Inst. 44, S. 141 - 147  
(1947)
- (5) Chatterji, S.: Mechanism of the  $\text{CaCl}_2$  attack on  
portland cement concrete. Cem. Concr. Res. 8, S.  
461 - 468 (1978)
- (6) Smolczyk, H.-G.: Flüssigkeit in den Poren des Betons  
- Zusammensetzung und Transportvorgänge in der  
flüssigen Phase des Zementsteins. Beton-Information  
24, (1), S. 3 - 10 (1984)
- (7) Grieb, W. E.; Werner, G.; Woolf, D. O.: Resistance of  
concrete surfaces to scaling by de-icing agents.  
Public Roads 32, (3), S. 64 - 73 (1962)
- (8) Ruffert, G.: Einfluß der Tausalzanwendung auf die  
Nutzungsdauer von Stahlbetonbrücken. Straße und Auto-  
bahn 29, (2), S. 54 - 58 (1978)
- (9) Standfuß, F.: Schäden an Straßenbrücken - Ursachen  
und Folgerungen. Straße und Autobahn 30, (10),  
S. 417 - 426 (1979)
- (10) Dartsch, B.: Betontag 1981. Tendenzen in Forschung  
und Bauausführung. Beton 31, S. 223 - 230 (1981)
- (11) Hahn, S.; Bauer, A.: Erfahrungen mit Feuchtsalz zur  
Glättebekämpfung auf Autobahnen in Rheinland-Pfalz.  
Straße und Autobahn 32, (1), S. 39 - 48 (1981)
- (12) Augustin, K.; Gregor, H.-D.; Klewer, M.; Kriesch,  
Chr.; Schreiber, H.; Szelinski, B. A.; Wey, H.:  
Streusalzbericht I. Berlin 1980

- (13) Der Senat von Berlin: Bericht über eine der Jahreszeit gemäße Sicherheit im Straßenverkehr. Drucksache 8/228, Abgeordnetenhaus von Berlin (1979)
- (14) Leh, H.-O.: Vergleichende Untersuchungen über die Beeinflussung von Vegetation und Böden durch Mischsalz und Natriumchlorid. Kurzbeschreibung des FE-Vorhabens. Anlage zum Protokoll der 6. Sitzung der Arbeitsgruppe "Großversuch umweltfreundlicheres Streusalz", Berlin 1980
- (15) Künzel, H.; Schwarz, B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Kurzber. Bauforsch. 13, (4), S. 75 - 77 (1972)
- (16) Maultzsch, M.: Betonspezifische Einflüsse auf die Chloriddiffusion. Amts- und Mitteilungsblatt der BAM 13, (3), S. 387 - 389 (1983)
- (17) Schimmelwitz, P.; Hoffmann, D.; Maultzsch, M.: Untersuchungen zur Einwirkung von Tausalzen auf Brückenbauwerke aus Stahlbeton. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, (370), S. 25 - 61 (1982)
- (18) Maultzsch, M.: Untersuchungen zur Einwirkung von Natriumchlorid auf Beton. 12. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berichte, S. 27 - 34, Berlin 1981
- (19) Frey, H.; Siebel, E.; Werse, H.-P.: Vergleich zweier Verfahren zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton. Beton 31, S. 185 - 188 (1981)
- (20) Brodersen, H. A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Diss. RWTH Aachen 1982
- (21) Bitumen und Asphalt, Taschenbuch, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin 1969
- (22) Brand, W.; Schulze, K.; Suß, G. u.a.: Laboruntersuchungen über den Einfluß von Auftau-Salzen auf die einzelnen Komponenten des bituminösen Mischgutes Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 1968, Heft 71
- (23) Holl, A.: Bituminöse Straßen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1971

- (24) Giodatti, F.:  
Die Tausalzbeständigkeit einer Zementstabilisierung  
Straße und Verkehr Nr. 8, 1978, Seite 330 ff.
- (25) Maultzsch, M.: Großversuch "Umweltfreundliches  
Streusalz" Berliner Bauwirtschaft 1980, Heft 24
- (26) Sacchetti, P.: Wirkung der Tausalze und Spikes-Reifen  
auf die bituminösen Straßenbeläge Bitumen 1968,  
Heft 1, Seite 7 ff.
- (27) Zichner, G.: Über die Wirkung von Tausalzen und  
Spikes-Reifen auf bituminösen Straßendecken  
Bitumen 1967, Heft 6, Seite 160 ff.
- (28) Feix, R.: Ursachen von Windeschäden im Straßenbau,  
Vortrag des VSVJ-Bayern, München 1984
- (29) Pump, H.; Lehdrich, J.; Plehn, S.: Zerstörungsfreie  
Messung der Schichtdicke von Fahrbahnbelägen  
Straßen- und Tiefbau 34 (1980), Heft 4
- (30) Schulze, K. u.a.: Zur Erfassung der Einflüsse auf  
den Straßenverschleiß durch Spikesreifen Straßenbau  
und Straßenverkehrstechnik 1975, Heft 191
- (31) Lampert, H.: Versuch "Winterdienst ohne Taumittel"  
Straße und Verkehr Nr. 2, Febr. 1980
- (32) Neumann, B.; Rother, M.; Vater, E.J.: Erarbeitung von  
Prüfkriterien für Betonbrückenabdichtungen und vorge-  
fertigten Dichtungsbahnen, Forschung Straßenbau und  
Straßenverkehrstechnik Heft 397, 1983
- (33) Vorläufiges Merkblatt für die Bestimmung der Biege-  
zugfestigkeit bituminöser Massen,  
Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Ver-  
kehrswesen e.V., Fassung August 1959
- (34) Pump, K.H.: Auswirkung des Verkehrs von Spikes-Reifen  
auf den Verschleiß bituminöser Straßenbeläge.  
Das stationäre Mischwerk 6 (1976), Seite 269
- (35) N.N.: Herstellung und Eigenschaften geblasener  
Bitumen für die Dach- und Dichtungsbahnindustrie.  
Das Dachdeckerhandwerk 1982, Heft 1



## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968  
**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)  
G. Andreae  
**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970  
J. Ziebs  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)  
A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971  
N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkentdichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971  
P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971  
H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution – Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971  
H. Veith  
**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971  
K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972  
D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972  
H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnitttiefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972  
H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972  
K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972  
E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972  
H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972  
E. Knublauch  
**Über Ausführung und Assagfähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**

Nr. 17/1972  
P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973  
W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973  
K. Kaffanke, H. Czichos

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973  
R. Rudolphi  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973  
D. Klaffke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973  
R. Rudolphi, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973  
W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973  
J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973  
E. Knublauch  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974  
P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM – Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974  
H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974  
H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974  
P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schallenfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)  
H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975  
G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975  
R. Rudolphi, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975  
A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)  
H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff Nr. 35/1976**

E. Limberger  
**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**

Nr. 36/1976 (vergriffen)  
J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976  
W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**

Nr. 38/1976  
K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976  
K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**

Nr. 40/1976  
H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976  
B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976  
S. Dietlen  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976  
W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976  
W. Matthees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**

Nr. 45/1976  
W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)  
G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**

Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**

Nr. 48/1977  
U. Holzlhöner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**

Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**

Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**

Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**

Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**

Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**

Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**

Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**

Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**

Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**

# Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing

- Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmimetrie mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
W. Rücker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleucentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitsbehältern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**

- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Maulzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworowski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**  
**Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**  
**- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -**
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung**  
**- Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ - Materials Research and Testing**  
**- Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Stüdt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**

- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Guan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren**  
**- Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiera  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anhydrid-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**



- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarunterschiede und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolph, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development  
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung. Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Slabs, Part I**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen.  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K.E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehgeschwindigkeit  
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II  
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreae, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogunke, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthes, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrezahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung  
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthes, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schön, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D Zeichenprogramm für Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitzkreutz, R. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung – Literaturübersicht –**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolph  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Haus-schornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthes  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**



Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei  
Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln  
und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-  
Emission.**  
Teil B: Textilien

Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitzkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**

Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum  
bei transienten Belastungsvorgängen**

Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wär-  
mebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hoch-  
auflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der  
Taufwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**

Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rücker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programm-  
system MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity  
Experimental (ICE)**

Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung  
wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel  
der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung  
der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgen-  
der Emulsionen**

Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dy-  
namischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-  
Wechselwirkung**

Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**

Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequen-  
zen für die Beförderung gefährlicher Güter**

Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer  
Versagenskonzepte**

Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-pla-  
stischen Bruchmechanik**

Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiser-  
regung für den Zeitraum**

Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggerhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfver-  
fahren bei Ingenieurbauwerken**

Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andrae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven  
Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatz-  
temperaturen bis ca. 1000 °C**

Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-  
Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl  
BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**

Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungser-  
gebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine  
mit anderen lichten Querschnitten**

Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies: Research and  
Development Trends and Needs**

Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im  
Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**

Nr. 183/ISBN 3-89429-163-x/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**

Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-J. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf**

**Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs  
„Umweltfreundlicheres Streusalz“)**

Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestim-  
mung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen  
aus Versuchen**  
– Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren  
und auf Versuche an Hausschornsteinen