

Die Beständigkeit von Beton unter Gebrauchsbeanspruchung

Bearbeitung eines Berichtes des ACI Committee 201 ¹⁾

Von Kurt Walz, Düsseldorf

Übersicht

Dieser Bericht enthält auf wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen aufgebaute Empfehlungen für Baustoffe und Verfahren, um Beton höchster Beständigkeit zu erzielen, um damit seinen Schutz gegen Zerstörungen zu gewährleisten sowie gegebenenfalls seine sachgemäße Ausbesserung durchzuführen. Nicht aufgenommen sind die Beanspruchungen des Betons durch Wasserosion und durch Feuer, weil diese Einwirkungen von anderen ACI-Ausschüssen bearbeitet werden ²⁾.

Der Bericht behandelt in 7 Abschnitten den Einfluß

*der Frost-Tau-Wechsel,
der Tausalze,
der chemisch angreifenden Stoffe,
der Abnutzungsbeanspruchung,
der Korrosion des Stahls,
der chemisch reagierenden Zuschlagstoffe und
die Ausbesserung angegriffenen Betons.*

In dem von H. Woods geleiteten, 1957 gegründeten Ausschuß wirken 21 anerkannte Fachleute mit. 62 Literaturstellen, die zur Begründung und zu vertieftem Studium beigegeben sind, beziehen sich fast ausschließlich auf nordamerikanische Arbeiten. Der Bericht gibt so eine gute Übersicht über den dortigen Stand der Erkenntnisse und außer-

¹⁾ Durability of concrete in service. Reported by ACI Committee 201. Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) S. 1771/1820. – Anmerkung: Die häufig wiederkehrende Abkürzung ACI bedeutet American Concrete Institute (Amerikanisches Betoninstitut, entspricht einer technisch-wissenschaftlichen Vereinigung für Beton); ASTM gilt für American Society for Testing and Materials (Amerikanische Gesellschaft für Prüfverfahren und Stoffeigenschaften). Näheres über diese Einrichtungen siehe Walz, K., P. Misch u. H. H. Schönrock: Beton in den USA. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 30, 1962, S. 10 und 11. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf, und Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf. – Alle amerikanischen Einheiten und Mengenangaben sind auf die bei uns gebräuchlichen umgerechnet.

²⁾ ACI Committee 210: Erosion resistance of concrete in hydraulic structures. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 259/271. – ACI Committee 216: Fireproofing or fire protection of structures. – Anmerkung: Siehe dazu auch Abstract, Symposium on fire resistance of concrete. Special Publication Nr. 5. Amer. Concr. Inst., Detroit 1962 (885), sowie Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) S. 1635/1641.

dem über die für die einschlägigen Prüfungen geltenden Normen, über die Beurteilung der Prüfergebnisse sowie über anerkannte Anleitungen und Empfehlungen zur Herstellung des Betons für verschiedene Aufgaben.

Mit der folgenden deutschen Bearbeitung wird versucht, den Committee-Bericht mit seinen auch für uns ausschlußreichen Angaben und Folgerungen ausreichend wiederzugeben. Die Gliederung sowie die wichtigeren Ausführungen und deren Charakter sind weitgehend erhalten.

Einleitung

Da der Bericht von der Beständigkeit des Betons handelt, wird die Festigkeit kaum berührt; es sei jedoch bemerkt, daß eine angemessene Beständigkeit in der Regel mit ausreichender Festigkeit verbunden ist, während das Umgekehrte nicht der Fall zu sein braucht.

Geeignete Baustoffe sind die erste Voraussetzung für dauerhafte Bauwerke. Da Abnahmevorschriften vorhanden sind, gibt es keine Entschuldigung für die Verwendung minderwertiger Ausgangsstoffe. Für die Herstellung von widerstandsfähigem Beton ist eine Reihe von Grundsätzen zu beachten.

Wasserzementwert. Der Wasserzementwert des frischen Betons beeinflußt mehr als alles andere die Güte des erhärteten Betons, weil von ihm die Güte des die Zuschlagstoffe verbindenden Zementleims bestimmt wird. Festigkeit und Undurchlässigkeit sowie die meisten anderen der geforderten Eigenschaften werden durch Herabsetzen des Wasserzementwerts verbessert.

Luftporen. Durch künstliche, fein verteilte Luftporen im Zementleim kann die Widerstandsfähigkeit bei Frostangriff wesentlich verbessert werden.

Zusammensetzung der Mischung. Zur optimalen Ausführung bedarf es eines Zuschlaggemisches, das für die vorgesehene Verarbeitung einen sehr niedrigen Wasserzementwert erlaubt.³⁾

Abmessen, Mischen und Einbringen. Um eine gleichmäßige Güte des eingebauten Betons zu erzielen, ist dem Abmessen, Mischen und Einbringen besondere Aufmerksamkeit zu widmen; hierfür besteht die ACI-Anleitung 614-59 [14].

Nachbearbeitung und Nachbehandlung. Eine angemessene Nachbehandlung ist erforderlich, um die gemäß der Zusammensetzung der Mischung zu erwartende Güte im gesamten Bauwerk sicherzustellen. Feuchtigkeit, Temperatur und Zeit sind dabei die wesentlichsten Wirkungsgrößen. Eine Empfehlung für die sachgemäße Nachbehandlung ist vom ACI Committee 612 aufgestellt worden [17]; die Bearbeitung nicht geschalteter Betonflächen ist in der ACI-Anleitung 614-59⁴⁾ enthalten.

³⁾ ACI Committee 613: Recommended practice for selecting proportions for concrete (ACI 613-54). Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1954/55) S. 49/64.

⁴⁾ Anmerkung: Siehe Abschnitt „Finishing of unformed surfaces“ in ACI 614-59, [14], S. 562.

1. Frost-Tau-Wechsel

Die Vorgänge beim Gefrieren eines so heterogenen Stoffes, wie dies der feuchte Beton ist, sind sehr verwickelt. Sie wurden eingehend und ziemlich befriedigend von Powers und seinen Mitarbeitern dargestellt [1, 2]. Die wesentlichste Kraft, die bei üblichem Beton und gewöhnlichem Winterwetter zum Frostschaden führt, ist der innere hydraulische Druck, der von dem Eis-Wasser-System während des Gefrierens erzeugt wird [3]. Davon gehen auch die folgenden Ausführungen aus.

1.1 Zementstein des Betons

Das bei der Hydratation des Zements nicht gebundene Wasser hinterläßt Kapillarrohräume oder Poren. Ein erheblicher Teil des ursprünglich vorhandenen Porenraumes wird vom Zementgel ausgefüllt, das sich bei der Hydratation des Zements bildet. Das Gel selbst ist ebenfalls porig. Aber diese Gelporen sind so klein, daß ihre Wasserdurchlässigkeit äußerst gering ist und das Wasser in ihnen bei Temperaturen, wie Beton sie unter natürlichen Verhältnissen annimmt, nicht gefriert. Es liegt also ein System von Kapillarporen vor, die größtenteils von einem nicht gefrierenden Gelsystem wesentlich geringerer Durchlässigkeit umgeben und durch dieses voneinander getrennt sind.

Wenn Wasser in einer gefüllten Kapillarpore gefriert, verursacht die Ausdehnung des Eis-Wasser-Systems entweder eine Ausdehnung der Pore um etwa 9 Vol.-% oder ein Herausdrücken der entsprechenden Wassermenge in den umgebenden Zementstein, oder es treten beide Vorgänge auf.

Die Größe des hydraulischen Druckes, der nötig ist, um bei zunehmender Eisbildung diese Wassermenge aus der Kapillarpore zu verdrängen, hängt ab von

1. der Entfernung der Porenwand bis zu einem Punkt, der eine Druckentlastung bringt,
2. der Geschwindigkeit der Eisbildung,
3. der Durchlässigkeit des dazwischen liegenden Stoffes,
4. dem elastischen Verhalten der Porenwand.

Steigt der entstehende Druck stark an, so wird die Porenwand, d. h. der Zementstein, geschädigt. Von den vier genannten Einflüssen kann nur der erste so gewandelt und beherrscht werden, daß unter ungünstigen Verhältnissen keine Schäden zu erwarten sind. Dies ist durch die Erzeugung künstlicher Luftporen möglich. In einem Porensystem neigt die Feuchtigkeit dazu, sich von größeren Poren zu den kleineren hin zu bewegen. Die künstlichen, durch LP-Zusatzmittel erzeugten Luftporen sind weit größer als die Kapillarporen; sie bleiben daher im wesentlichen wasserfrei und können deshalb das beim zunehmenden Gefrieren nach und nach verdrängte Wasser aufnehmen. Das aus den Kapillarporen in diese künstlich erzeugten Poren gepreßte Wasser wandert beim Auftauen durch die Wirkung der Kapillarkräfte wieder in die Kapillarporen zurück. Die Erfahrung lehrt, daß im Zementstein eines normalen Betons keine sprengenden Drücke auftreten, wenn so viele Luftporen im Zementstein vorhanden sind, daß keine Kapillarporenwand mehr

als rd. 0,17 mm von einer Luftpore entfernt ist (Anmerkung: Das ist ein rechnerischer Mittelwert).

Diese Betrachtungen gehen davon aus, daß die Kapillarporen bei Gefrierbeginn mit Wasser gefüllt sind. Die Anfälligkeit des Zementsteins gegen Frosteinwirkung hängt wesentlich von dem Grad der Durchfeuchtung ab. Daneben spielen auch die Größe des gesamten kapillaren Porenraumes und die Eigenschaft und Menge des zu seiner Füllung verfügbaren Gels eine Rolle. Diese Eigenschaften stehen in Beziehung zum Wasserzementwert und zum Hydratationsgrad des Zements. Ein gut nachbehandelter Zementstein (Beton) mit niederem Wasserzementwert ist fester und weist kleinere sowie eine geringere Zahl anfälliger Kapillarporen auf als ein Zementstein geringer Güte; er besitzt daher einen größeren Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel.

1.2 Zuschlagestein

Von Zuschlag mit sehr geringer Porigkeit kann der Druck des gefrierenden Wassers der elastische Verformung aufgenommen werden; bei größerer Porigkeit sind auch im Gestein Druckentlastungsstellen nötig, damit ein Zersprengen nicht eintritt. Solche Stellen können Makroporen im Gesteinskorn oder Hohlräume sein, die um das Zuschlagkorn liegen. Hierbei ist ebenfalls die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins wichtig, da Zuschlagkörner mit hoher Durchlässigkeit schneller zum Rand entwässern und dadurch kein sehr hoher Druck im Korn entsteht. Man kommt damit zu der Auffassung, daß für wasser-gesättigte Zuschlagkörner mit einem bestimmten Porensystem und bei einem bestimmten Gefrierverlauf eine kritische Korngröße besteht, die nicht überschritten werden soll. Wenig günstiger Zuschlagstoff kann daher mitunter durch Brechen auf kleinere Korngröße verbessert werden. Für normale Feuchtigkeits- und Gefrierbedingungen ist die kritische Korngröße eines Kieselschiefers mit mittelmäßiger Wasseraufnahme, jedoch geringer Durchlässigkeit auf etwa 1,2 cm veranschlagt worden, dagegen die eines Dolomits mit größerer Wasseraufnahme, aber viel höherer Wasserdurchlässigkeit unter sonst gleichen Verhältnissen auf über 75 cm [4]. Diese Angaben gelten nur für freie, nicht mit Zementstein umhüllte Zuschlagkörner; sie sind jedoch im Beton von einem mehr oder weniger dichten Zementstein umgeben. Es ist wahrscheinlich, daß künstliche Luftporen sich manchmal auch für anfällige Gesteinskörner im Beton günstig auswirken, doch werden sie in vielen Fällen nicht genügen. Eine kritische Größe für das Zuschlagkorn kann man daher nur benutzen, um Unterschiede im Frostverhalten verschiedener Zuschlagstoffe zu erklären. Im ganzen hängt die Anfälligkeit eines Zuschlags beim Gefrieren von dessen Wassergehalt und dieser in jungem Alter des Betons weitgehend von der Kernfeuchtigkeit des Zuschlags beim Mischen ab. Bei älterem Beton, auch bei ursprünglich trockenem Zuschlag, sind die Umweltbedingungen und die Undurchlässigkeit des Zementsteins von Einfluß. Wenn der Zuschlag nur wenig anfälliges Gestein oder wenig Körner über der kritischen Größe enthält, so tritt keine durchgehende Zerstörung des Betons ein; es bilden sich jedoch vereinzelt Aussprengungen an der Oberfläche.

1.3 Folgerungen

Aus den vorausgegangenen Erörterungen können für die Herstellung eines Betons mit hohem Frostwiderstand folgende Forderungen hergeleitet werden:

1. Erzeugung künstlicher Luftporen durch LP-Zusatzmittel,
2. Auswahl eines Zuschlagstoffes mit einer gegenüber der zu erwartenden Beanspruchung ausreichenden Beständigkeit,
3. sorgfältig bereiteter, eingebauter und nachbehandelter Beton mit niedrigerem Wasserzementwert,
4. Entwurf des Bauwerks derart, daß es möglichst wenig der Feuchtigkeit ausgesetzt ist und das Wasser sofort abgeleitet wird,
5. Vermeidung von Baustoffen und Verfahren, die zu zerstörenden Vorgängen Anlaß geben (siehe die späteren Abschnitte).

Im einzelnen ist folgendes zu beachten:

1.3.1 Entwurf

Auf gute Wasserabführung ist besonders Wert zu legen. Die obere Fläche von Mauern und alle äußeren Flächen sollen geneigt ausgeführt werden. Vermeidung von unnötigen Fugen und Entwässerung notwendiger Fugen sind vorzusehen. Durch Anordnung von Wasserspeichern kann vermieden werden, daß Wasser unter Bauteile fließt.

Auch wenn sich selten Wasser unter Betonbelägen und -fundamenten sammeln kann, sollte doch dem Untergrund Beachtung geschenkt werden; siehe dazu ACI Standard 617-58 [5].

Zahlreiche ausgedehnte Untersuchungen an Brücken und anderen Bauwerken haben gezeigt, daß eine Beziehung zwischen Frost-Tau-Schäden an bestimmten Bauteilen und einem wahrscheinlich übermäßigen Feuchtigkeitsanfall bestand, der durch die Ausbildung des Bauteils bedingt war [6, 7, 62].

1.3.2 Betonzusammensetzung

Luftporen. Beton, der Feuchtigkeit und Frost ausgesetzt ist, sollte mit künstlichen Luftporen versehen werden. Ein Zuviel an Luftporen hat eine unnötige Festigkeitsminderung zur Folge, während zu wenig Luftporen keinen angemessenen Schutz abgeben. Die empfohlenen Luftgehalte finden sich in Tafel 1. Die

Tafel 1 Luftgehalt des Frischbetons

Größtkorn des Zuschlags mm	Durchschnittlicher Richtwert ‰	Mindestwert ‰
12	8	7
19	7	6
25	6	5
38	5,5	4,5
51	5	4
76	4,5	3,5
152	4	3

Luftporen können durch LP-Zement, durch Zugabe eines LP-Zusatzmittels am Mischer oder durch Verbindung beider Möglichkeiten erzeugt werden. LP-Zement allein erlaubt keine richtige Abstimmung des Luftgehalts, weil der Luftgehalt vom Zuschlag, dem Mischertyp, der Mischzeit, der Temperatur und noch anderen Einflüssen abhängt. Obwohl sich gelegentlich übermäßige Luftgehalte einstellen können, so ist doch die Benutzung eines LP-Zements das geeignetste Verfahren, um sich auf kleinen Baustellen, auf denen ein Luftgehaltsprüfer fehlt, wenigstens ein Mindestmaß an Schutz gegen Frost-Tau-Einwirkung zu verschaffen. Die Zugabe eines LP-Zusatzmittels am Mischer ist aber vorzuziehen, wenn Geräte für die Überwachung des Luftgehalts der Mischungen verfügbar sind.

Den zuvor für Beton angegebenen Luftgehalten entsprechen Luftgehalte im Zementleim von 17 bis 29 % [9]. Wenn ein wirkungsvolles LP-Zusatzmittel zugegeben worden ist, wird sich der Abstandsfaktor für das Luftporensystem zwischen 0,1 und 0,2 mm bewegen und damit eine allgemein anerkannte Sicherheit bieten. Der Luftgehalt des Frischbetons kann nach ASTM Standard C 173 durch Austreiben der Luft (volumetrisches Verfahren) bestimmt werden oder nach ASTM Standard C 231 durch das Druckausgleichsverfahren. Der Luftgehalt im erhärteten Beton und andere Kennwerte für das Luftporensystem können nach ASTM Standard C 457 durch mikroskopische Untersuchung an Schliffrn ermittelt werden.

1.3.3 Wasserzementwert

ACI Standard 614-54 enthält Richtwerte für den höchstzulässigen Wasserzementwert von LP-Beton je nach Verwendungsart, die in Tafel 2 wiedergegeben sind. Wird Beton gleichzeitig Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt, so wird stets die Einführung künstlicher Luftporen vom ACI Committee 613 empfohlen. Wenn trotzdem mit Beton ohne Luftporen gebaut wird, sollte der Wasserzementwert so niedrig wie möglich gehalten werden und höchstens bis 0,40 reichen.

1.3.4 Andere Faktoren

Das Verhältnis von feinem zu grobem Zuschlag⁵⁾ sollte nach einem begründeten Verfahren, z. B. gemäß Anweisung des ACI Committee 613, so festgelegt werden, daß der Beton ohne störende Entmischung zubereitet, eingebaut und verdichtet werden kann. Ein Beton ohne Risse und Nester ist im allgemeinen für Wasser undurchlässig.

1.3.5 Betonbaustoffe

Zemente. Die verschiedenen Typen des Portlandzements ergeben bei Verwendung zu zweckmäßig zusammengesetztem LP-Beton keinen unterschiedlichen Frostwiderstand. Bei Beton ohne Luftporen zeigten jedoch verschiedenartige Zemente große Unterschiede. Laboratoriumsversuche mit LP-Betonen aus „Portland-Schlackenzement“ (Portland blast-furnace slag cement, das ist

⁵⁾ Anmerkung: „Feines“ bedeutet Sand; dieser wird durch das Maschensieb von 4,8 mm Weite nach oben begrenzt.

Tafel 2 Höchstens zulässiger Wasserzementwert (nach Gewicht) für verschiedene Bauteile und Umwelteinflüsse

Bauteil	Umweltbedingungen ¹⁾					
	Schriffe, weil auseinanderliegende Temperaturen oder häufige Wechsel zwischen Gefrieren und Auftauen (nur LP-Beton)		Gemäßigte Temperaturen, selten unter Gefrierpunkt oder regnerisch oder trocken			
	An der Luft	In der Wasserlinie, im Bereich schwankenden Wasserspiegels oder von Sprühwasser	In der Wasserlinie, im Bereich schwankenden Wasserspiegels oder von Sprühwasser		An der Luft	In der Wasserlinie, im Bereich schwankenden Wasserspiegels oder von Sprühwasser
	In Süßwasser	In Meerwasser oder in Berührung mit Sulfaten ²⁾	In Süßwasser	In Meerwasser oder in Berührung mit Sulfaten ²⁾	In Süßwasser	In Meerwasser oder in Berührung mit Sulfaten ²⁾
Dünne Bauteile, wie Brüstungen, Bord-schwellen, Fensterbänke, Leisten, orna-mentaler oder architektonischer Beton; Stahlbetonpfähle, Rohre und Stahlbeton mit weniger als 2,5 cm Überdeckung	0,49	0,45	0,40		0,53	0,49
Mäßig dicke Bauteile, wie Stützmauern, Widerlager, Pfeiler, Träger	0,53	0,49	0,45 ³⁾		4)	0,53
Äußere Partien massiger Bauteile	0,58	0,49	0,45		4)	0,53
Unterwasserbeton	–	0,45	0,45		–	0,45
Platten auf dem Untergrund	0,53	–	–		4)	–
Gegen Witterungsbeanspruchungen ge-schützt, im Gebäudeinnern oder im Boden	4)	–	–		4)	–
Teile, die nur in den ersten Jahren Frost-wechseln ausgesetzt sind (z. B. in der Zeit vor einer Einschüttung oder Verkleidung)	0,53	–	–		4)	–

¹⁾ Bei starker Witterungsbeanspruchung sollte immer LP-Beton verwendet werden; in mildem Klima ist seine verbesserte Verarbeitbarkeit nützlich

²⁾ Boden oder Grundwasser mit mehr als 0,2 % Sulfat

³⁾ Bei Verwendung von sulfatwiderstandsfähigem Zement kann der noch zulässige Wasserzementwert um 0,05 erhöht werden

⁴⁾ Der Wasserzementwert sollte nach der erforderlichen Festigkeit und Verarbeitbarkeit festgelegt werden

Hochofenzement) zeigten nur geringen Einfluß der Schlackenbeigabe auf die Beständigkeit; Flugasche kann den Luftgehalt vermindern. Andere Puzzolane haben in einigen Fällen die Beständigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechseln herabgesetzt.

Der Zement sollte einer der folgenden Vorschriften genügen:

- ASTM C 150 : Portlandzement [10],
- ASTM C 175 : LP-Portlandzement [10],
- ASTM C 205 : Hochofenzement [10].

Flugasche soll die Anforderungen der ASTM Standard C 305 : „Flugasche für die Verwendung als Zusatz zu Portlandzementbeton“ [10] erfüllen und Puzzolane die der ASTM Standard C 402: „Natürliche, rohe oder calcinierte Puzzolane für die Verwendung als Zusatz zu Portlandzementbeton“ [10].

Zuschlagstoffe. Die in der ASTM Standard C 33: „Betonzuschlagstoffe“ [10] getroffenen Festlegungen überlassen die Auswahl eines beständigen Zuschlagstoffes weitgehend dem Betoningenieur. Der Betoningenieur soll möglichst Bauwerke, die mit dem betreffenden Zuschlagstoff ausgeführt wurden, zu seiner Beurteilung mit heranziehen. Obwohl Laboratoriumsversuche nützlich sind, erlauben sie zur Zeit noch keine ausreichend sichere Bewertung der Beständigkeit eines Zuschlags. Eine gewisse Unterrichtung über das wahrscheinliche Verhalten bekommt man durch eine Prüfung auf Wasseraufnahme, Fehlerfreiheit durch den Sulfatversuch, Verhalten des Zuschlags bei Frost-Tau-Wechseln und im LP-Beton sowie durch Feststellungen über die Porenstruktur, ferner durch petrographische Vergleiche mit Zuschlagstoffen bekannten Gebrauchsverhaltens. Die ASTM Special Technical Publication No. 169: „Die Bedeutung von Versuchen und die Eigenschaften von Beton und Betonzuschlagstoffen“ bringt eine kurze Beschreibung solcher Prüfungen und abgewogene Urteile über deren Nutzbarkeit.

Weitere Auskunft gibt der Bericht des ACI Committee 621: „Auswahl und Verwendung von Zuschlagstoffen für Beton“ [11]. Dieser Bericht stellt fest: „Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen des Zuschlagstoffes im Beton liefern wahrscheinlich die beste Beurteilung auf Fehlerfreiheit.“ Als Prüfungen sind brauchbar die ASTM Prüfverfahren C 290, C 291 und C 292⁶⁾. Im Highway Research Board, Special Report 47 (1959): „Gemeinschaftsversuche über Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen von Beton“ werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren erörtert. Solche Verfahren sind zum Vergleich zweier Zuschlagstoffe nützlich. Einige mit der Versuchstechnik wohl erfahrene, höchst befähigte Organisationen haben sich aber auch berechtigt gefühlt, Prüf-Grenzwerte festzulegen. Die ASTM-Prüfverfahren sind kritisiert worden, weil bei der Prüfung mit wassergesättigten Probekör-

⁶⁾ Anmerkung: Diese drei Prüfverfahren unterscheiden sich durch die Gefriergeschwindigkeit und das Wärmeübertragungsmittel beim Gefrieren und Auftauen (Wasser, Luft oder Lauge); Näheres darüber siehe auch Schäfer, A.: Vergleichende amerikanische Untersuchungen über 4 Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an Beton. beton 12 (1962) H. 7, S. 314/318; ebenso Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 93/104.

pern begonnen wird, während normalerweise beim Beton, wie er in der Praxis verwendet wird, dies bei Beginn des Winters nicht der Fall ist [12]. Auch die zum Teil hohe Gefriereschwindigkeit, der mögliche, geringere Wassersättigungsgrad des Zuschlags und die kleinen Probenabmessungen im Verhältnis zur Zuschlagkorngröße wurden als Abweichungen des Versuchs gegenüber der Praxis herausgestellt. Da in vielen Gegenden Zuschlagstoffe, die ohne weiteres als hochwertig einzuschätzen sind, nicht vorkommen, könnte ein sicheres Prüfverfahren auch zu wirtschaftlichen Vorteilen führen. Doch ist im Grunde nur eine relative Bewertung verschiedener Zuschlagstoffe möglich; ein sicheres Urteil abzugeben, daß der eine oder andere Zuschlagstoff, z. B. aus der Mitte einer Wertungsreihe von geprüften Zuschlagstoffen, unter bestimmten Bedingungen ausreicht, ist nicht angängig.

Versuche sind vorgeschlagen [12] und ausgeführt [13] worden, bei denen die Zuschlagstoffe für den LP-Prüfbeton vorher auf einen Feuchtigkeitsgehalt gebracht wurden, wie er sich erfahrungsgemäß bis zum Beginn des Winters einstellt. Eine während des Frostversuches gemessene Verlängerung von 5/100 000 wurde dabei als Anzeichen gewertet, daß der kritische Sättigungswert erreicht und der Zuschlag von da an frostanfällig ist. Wenn die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Sättigung kürzer ist als die normale Gefrierperiode der betreffenden Gegend, wird der Zuschlagstoff für solchen Bauwerksbeton als ungeeignet erachtet. Stellt sich heraus, daß diese Zeitspanne größer ist, so wird angenommen, daß der Beton den Winter ohne Schaden übersteht und daß er im folgenden Sommer wieder auf seinen Ausgangszustand austrocknet. Die Versuche sind auch im Vergleich mit praktischen Erfahrungen erfolgversprechend; sie dauern jedoch länger als jene nach ASTM Standard C 290 und C 291.

1.3.6 Arbeitsvorgang

Alle anerkannt guten Betonierverfahren zur Erlangung hochwertigen Betons tragen auch zur Erhöhung des Frostwiderstandes bei. In dieser Hinsicht sind beachtenswert die ACI Standard 614-59: „Empfehlungen für das Abmessen, Mischen und Einbringen des Betons“ [14], ACI Standard 604-56: „Empfehlungen für das Betonieren im Winter“ [15] und ACI Standard 605-59: „Empfehlungen für das Betonieren bei heißem Wetter“ [16], ferner der Bericht des ACI Committee 612: „Nachbehandlung des Betons“ [17].

Von besonderer Bedeutung ist die Überwachung des künstlich erzeugten Luftporengehalts.

1.3.7 Schutz

Gut konstruierte Bauwerke aus gut verdichtetem, hochwertigem Beton und beständigen Zuschlagstoffen benötigen keine schützende Oberflächenbehandlung. Machen sich bei anderem Beton Frostschäden oder andere zersetzende Einwirkungen bemerkbar, so können Oberflächenbehandlungen die Nutzungsdauer erhöhen. Ihre Hauptaufgabe ist, das Wasser fernzuhalten; alle solche Behandlungen helfen jedoch nur eine beschränkte Zeit lang.

Bei der Prüfung von 85 handelsüblichen Dichtungsanstrichen fand Blackburn [18] nur zwei, die er als undurchlässig einreichte. Beide waren pigmentierte Leinölanstriche. Die undurchlässigen Anstriche waren beständiger und gaben einen überlegenen Schutz für Betonprismen ab, die der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung unterworfen wurden. Undurchlässige Anstriche können aber auch die Feuchtigkeit im Beton zurückhalten und in manchen Fällen mehr schaden als nützen. Das „Concrete Manual“ des „Bureau of Reclamation“ empfiehlt in der 6. Ausgabe, 1955, S. 350, eine Oberflächenbehandlung der obersten 60 cm von freistehenden Bauteilen und von solchen, die mit Wasser oder Sprühwasser in Berührung kommen und gefrieren können. Dazu dienen zwei Anstriche mit rohem Leinöl mit einer Temperatur von 80 °C (der erste ist 1 : 1 mit Terpentinöl verdünnt).

Junger Beton sollte vorher mit einer Mischung von 0,3 kg Phosphorsäure, 0,2 kg Zinkchlorid und 10 l Wasser neutralisiert werden. Auf die Ölbehandlungen sollen zwei Bleiweiß-Ölfarbanstriche folgen, um ein Oxydieren des Öls zu verhindern. Andere Behandlungen [19] der trockenen und neutralisierten Betonfläche schließen Pech, Teer, Tungöl und Lack ein. Silicone sind sowohl in Wasser gelöst als auch mit organischem Lösungsmittel als Schutzauftrag angewendet worden. Diese Anstriche verstopfen die Poren nicht, machen sie aber wasserabstoßend. Einige frühere Untersuchungen schienen ihre Wirksamkeit zu bestätigen, doch ließen jüngere, unveröffentlichte Beobachtungen aus der Praxis wie auch Laboratoriumsversuche erkennen, daß sie unwirksam oder möglicherweise schädlich sein können, insbesondere bei Auftrag auf der dem Wassereintritt gegenüberliegenden Seite. Dazu wurde herausgestellt, daß ein Anstrichtyp, der ein „Atmen“ ermöglicht, zu einer Anreicherung von Salzen hinter der Oberfläche und einem möglichen Abschalen des Betons führen kann, weil gelöste Salze hinter der Oberfläche verbleiben, während die Feuchtigkeit nach außen verdunsten kann.

1.3.8 Bestimmung der Schadensursache (Diagnose)

Die Bestimmung der Ursache von Schäden ist manchmal schwierig, besonders wenn mehrere Einwirkungen beteiligt sind. Sowohl chemisch verursachtes Treiben als auch Frostdehnung haben feine Risse zur Folge, wodurch wiederum mehr Feuchtigkeit eindringen kann. Häufig sind Oberflächenabwitterungen der Einwirkung von Tausalzen zuzuschreiben. Netzrißbildung mit willkürlicher Rißverteilung und mehr oder weniger offenen Rissen wird den unterschiedlichen Raumänderungen zwischen verschiedenen Teilen oder Höhenlagen des Betons zugeschrieben. D-Risse [6], das sind Ablagerungs- oder Zerfallrisse (deposit or deterioration cracks), werden direkt der Gefrier- und Tau-Wechsel-Einwirkung zugeschrieben. Diese feinen Risse haben einen mehr oder weniger geringen Abstand, sind zueinander gleichlaufend und treten zuerst entlang von Kanten, Fugen und Rissen in der Konstruktion auf. Diese D-Risse, häufig mit dunklen Calciumcarbonatablagerungen gefüllt, kündigen in der Regel ein Verwittern oder einen allgemeinen Zerfall an.

2. Tausalze

2.1 Einleitung

Die Verwendung von Natrium- und Calciumchlorid zur Eisbeseitigung bei der Winterwartung der Betonstraßen führte zu Oberflächenschäden. In neueren Übersichten des Highway Research Board berichten viele Straßenbauverwaltungen, daß diese Einwirkung eine der Hauptursachen der Schädigung von Decken ist. Narbenbildung und Abschalen an der Betonoberfläche werden als eine wesentliche Erscheinungsform vermerkt. Der Vorgang ist noch nicht völlig geklärt. Die Tatsache, daß Tausalze, die sich physikalisch und chemisch stärkstens unterscheiden, gleichermaßen zu diesen Schäden Anlaß geben, weist darauf hin, daß die Wirkung mehr physikalisch als chemisch ist. Für eine gründlichere Analyse wird auf die Literatur verwiesen [20, 21, 22].

2.2 Erörterung

Zahlreiche Beispiele stark mit Tausalzen gestreuter Fahrbahndecken aus LP-Beton aus Gegenden mit strengem Winterwetter zeigen selbst nach 20 Jahren (seit Beginn der Verwendung von LP-Beton) keinerlei Schäden, die auf eine Tausalzeinwirkung zurückzuführen sind. Sie beweisen, daß tausalzbeständige Decken gebaut werden können. Doch sind LP-Zusatzmittel kein Allheilmittel. Auch alle anderen, für die Beständigkeit von dauerhaftem Beton nötigen Maßnahmen müssen peinlich genau eingehalten werden. Der Beton sollte so steif wie möglich eingebaut und durch Rütteln verdichtet werden⁷⁾. Andererseits hat eine eingehende Forschungsarbeit gezeigt, daß eine Vergrößerung des Setzmaßes bis zu 7,5 cm keinen störenden Einfluß hatte. Einbau und Nacharbeit sollten so ausgeführt werden, daß Schlämme- oder Mörtelanreicherungen vermieden werden, weil sie wegen ihrer abweichenden physikalischen Eigenschaften und ihres geringen Luftporengehalts später dazu neigen, sich vom Beton abzulösen. Eine sorgfältige Nachbehandlung ist nötig, damit eine ausreichende Zementhydratation und eine widerstandsfähige Oberfläche entstehen. Tausalze schädigen jüngeren Beton mehr als älteren. Aus diesem Grunde sollte die Behandlung mit Tausalzen aufgeschoben werden, bis der Beton wenigstens 6 Wochen bei einer Temperatur über 4,5 °C erhärten konnte.

Eine große Anzahl von Oberflächenbehandlungen wurde versucht, um Beton ohne künstliche Luftporen vor Schädigung zu bewahren; angewendet wurden Silicone, Leinöl, Ölfarbanstriche, Asphaltlacke, Teer, Öl, Wachs, Fluat, Kieselsalze und Kunstharze. Mit einigen dieser Behandlungen hatte man mäßigen Erfolg, die Schädigung zu verzögern. Gekochtes Leinöl ist bei vernünftigem, wirtschaftlichem Aufwand der wirkungsvollste dieser Stoffe. Es wird gewöhnlich zweimal auf den angemessen trockenen und sauberen Beton aufgetragen. Der erste Auftrag erfolgt mit einem 1 : 1 durch Schwerbenzin, Lackbenzin oder Terpentinöl verdünnten Gemisch (1 l auf 11 m²) und der zweite mit reinem Leinöl (1 l auf 14,5 m²) auf neuem Beton oder mit

⁷⁾ ACI Committee 609: Consolidation of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 985/1011.

verdünntem Leinöl auf alten Beton. Manchmal wird auch LP-Beton damit behandelt, wenn er im Herbst hergestellt wurde und im ersten Winter Tausalzen ausgesetzt werden soll.

2.3 Empfehlungen

Um die schädigende Wirkung der Tausalze auf ein Mindestmaß zurückzuführen, wird das folgende Vorgehen empfohlen:

1. Verwendung von Baustoffen hoher Güte (Zuschlagstoffe nach ASTM Standard C 33 oder nach Vorschriften der Straßenbaubehörde; Normzement).
2. Der Beton, mit mindestens 335 kg Zement/m³ und einem Wasserzementwert von höchstens 0,45, muß künstliche Luftporen enthalten. Diese Mischung soll so aufgebaut werden, daß eine passende Verarbeitbarkeit entsteht sowie Wasserabsondern und Entmischen möglichst vermieden werden (Anleitung dazu siehe ACI Standard 613-54; „Empfehlung zur Festlegung der Betonzusammensetzung“). Die in Tafel 1 aufgeführten Luftgehalte sollten eingehalten werden.
3. Das Abmessen und Mischen des Betons sollte sorgfältig überwacht [14] und das noch mögliche Mindestsetzmaß mit einer Abweichung von 2,5 bis 5 cm eingehalten werden. Ein wesentlich höherer Luftgehalt muß wegen der Herabminderung der Festigkeit und des Abnutzungswiderstandes vermieden werden.
4. Beim Verdichten und Nacharbeiten darf zusätzlich keine Schlämme an der oberen Fläche angereichert werden, weil diese gegenüber Tausalzen besonders anfällig ist.
5. Dem Schutz des Betons und seiner Nachbehandlung ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen; allgemeine Forderungen finden sich in ACI Standard 617-58 [5]; siehe ferner ACI Standard 604-56 [15] und ACI Standard 605-59 [16]. Der Beton muß bei Vorliegen mittlerer Temperatur mindestens 72 Stunden, besser länger, feucht gehalten werden. Das Betonieren im Frühjahr hat offensichtliche Vorteile gegenüber dem im Spätherbst.
6. Die Beständigkeit wird besonders gesteigert, wenn der Beton vor Eintritt des Frostes etwas austrocknen kann.
7. Für besondere Verhältnisse besteht die Möglichkeit, einen erhöhten Schutz durch wasserabweisende Oberflächenbehandlungen zu schaffen, z. B. mit gekochtem Leinöl.

3. Angreifende chemische Stoffe

3.1 Einführung

Beton guter Beschaffenheit ist gegen viele natürlich vorkommende Chemikalien widerstandsfähig. Zweckmäßig zusammengesetzt, eingebaut und nachbehandelt widersteht er den meisten Wässern, Böden und Atmosphärien. Es gibt jedoch chemische Umwelteinflüsse, durch die die Lebensdauer auch des besten Betons verkürzt wird. Die Kenntnis dieser Bedingungen erlaubt

es, Maßnahmen gegen eine Zerstörung zu ergreifen. Die meisten Chemikalien, die einen bedeutsamen Angriff zur Folge haben, müssen in gelöster Form vorliegen und eine Mindestkonzentration aufweisen; der Beton wird selten – wenn überhaupt – durch feste, trockene Chemikalien angegriffen. Wirken angreifende Lösungen unter Druck nur von einer Seite, so ist der Beton anfälliger, weil die Flüssigkeit durch den Druck tiefer einzudringen vermag. Wenn an einer freien Oberfläche eine Verdunstung möglich ist, können sich an dieser Oberfläche gelöste Salze anreichern; sie führen möglicherweise neben dem chemischen Angriff noch zu mechanischen Absprengungen.

Tafel 3 Wirkung verschiedener chemischer Stoffe auf Beton *)

Art	Wirkung auf Beton
Säuren	
Carbolsäure	zersetzt langsam
Essigsäure	zersetzt langsam
Flußsäure	zersetzt
Gerbsäure	zersetzt langsam
Humussäure	hängt von der Art des Humus ab; kann jedoch langsam zersetzen
Milchsäure	zersetzt langsam
Oxalsäure	keine
Phosphorsäure	greift die Oberfläche gering an
Salzsäure	zersetzt
Salpetersäure	zersetzt
Saure Wässer	natürl. saure Wässer ätzen die Mörtelfläche an, aber die Einwirkung hört dann gewöhnlich auf
Schwefelsäure	zersetzt
Schweiflige Säure	zersetzt

Salze und Alkalien (Lösungen)	
Carbonate des Ammoniums Kaliums Natriums	keine
Chloride des Calciums Kaliums Natriums Strontiums	keine, wenn der Beton in der Lösung nicht wechselnd durchfeuchtet und trocknet

*) Aus: St-4-2 „Wirkung verschiedener Stoffe auf Beton und nötigenfalls erforderliche Schutzbehandlung“ (Anmerkung: Es handelt sich um eine von der Portland Cement Association, Chicago, herausgegebene Schrift).

Art	Wirkung auf Beton
-----	-------------------

noch Salze und Alkalien (Lösungen)

Chloride des Ammoniums Eisens Kupfers Magnesiums Quecksilbers Zinks	zersetzen langsam
Fluoride	keine, mit Ausnahme des Ammoniumfluorids
Hydroxyde des Ammoniums Calciums Kaliums Natriums	keine
Nitrate des Ammoniums	zersetzen
Nitrate des Calciums Kaliums Natriums	keine
Silikate	keine
Sulfate des Ammoniums	zersetzen
Sulfate des Aluminiums Calciums Eisens Kaliums Kobalts Kupfers Mangans Natriums Nickels Zinks	zersetzen, jedoch sind Betonwaren, die in gespanntem Dampf gehärtet werden, sehr widerstandsfähig
Übermangansaures Kali (Kaliumpermanganat)	keine

Petroleumdestillate

Schweröle **) unter 35° Bé	keine
Leichtöle, über 35° Bé	
Benzin	
Gasolin	
Leichtbenzin mit hohem Oktangehalt	keine, erfordern undurchlässigen Beton und im allgemeinen Oberflächenbeschichtungen gegen Durchdringen
Paraffinöl	
Schwerbenzin	

**) Viele Schmieröle und andere Öle enthalten etwas Pflanzenöl. Beton sollte gegenüber solchen Ölen wie gegen Pflanzenöle geschützt werden.

Art	Wirkung auf Beton
-----	-------------------

Kohlenteerdestillate

Alizarin	keine
Anthracen	
Benzol (Isopropylbenzol)	
Cumol	
Paraffin	
Pech	
Toluol	
Xylol	
Kreosot	zersetzen langsam
Kresol	
Phenol	

Pflanzenöle

Baumwollsaamenöl	ohne Luftzutritt keine Einwirkung; geringer Angriff bei Luftzutritt
Terpentin-(Harz)öl	keine
Erdnußöl	zersetzen die Oberfläche langsam
Kokosnußöl	
Leinöl (***)	
Mandelöl	
Mohnöl	
Olivenöl	
Rapsöl	
Rizinusöl	
Soyabohnenöl (***)	
Tungöl (***)	
Walnußöl	
Terpenlinöl	keine; beträchtliches Eindringvermögen

Tierische Fette und Fettsäuren

Fischöl	die meisten Fischtrane greifen schwach an
Knochenöl	zersetzen die Oberfläche langsam
Schweinefett und Specköl	
Talg und Talgöl	

***) In dünner Schicht rasch oxydierend und ohne Einwirkung. Die angegebene Wirkung tritt nur auf, solange das Öl flüssig ist.

Art	Wirkung auf Beton
Verschiedenes	
Alkohol	keine
Ammoniakwasser (Ammoniumhydroxyd)	keine
Apfelwein	zersetzt; siehe Essigsäure
Ätznatron	keine auf Beton mit Kalksteinzuschlag
Bier	nicht fortschreitend, jedoch Beschichtung von Lager- und Gärtanks gegen Schädigung des Biers
Bleichende Lösungen	gewöhnlich keine
Borax	keine
Borsäure	keine
Buttermilch	siehe Milch
Essig	zersetzt; siehe Essigsäure
Formalin	wässrige Lösung von Formaldehyd zersetzt
Fruchtsäfte	die meisten Fruchtsäfte wirken, wenn überhaupt, nur wenig ein, da Weinsäure und Zitronensäure kaum merkbar angreifen
Gerbereibrühen	hängt von der Zusammensetzung ab; die meisten sind ohne Wirkung; Gerbereien, die Chrom verwenden, melden keine Schädigung
Getreidestärke-Sirup	zersetzt langsam
Glyzerin	zersetzt langsam
Honig	keine
Kohle	Zersetzung bei hohem Pyrit- und Feuchtigkeitsgehalt, jedoch durch Bildung eines unlöslichen Films stark verzögert; Verhinderung durch Oberflächenbehandlung
Kohlenaschen	können etwas zersetzen
Melasse	keine, wenn Beton undurchlässig und sorgfältig nachbehandelt ist
Milch	keine; beim Sauerwerden greift Milchsäure an
Molke	Milchsäure greift an
Salmiak	wie Ammoniumchlorid; geringe Zersetzung
Salpeter	keine
Salzlauge (Sole)	gewöhnlich keine, wenn Beton undurchlässig
Sauerkraut	wenn überhaupt, gering
Silage	gering
Soda	keine
Sulfillauge	zersetzt langsam
Traubenzucker	zersetzt langsam
Trinatriumphosphat	keine

Art	Wirkung auf Beton
Verschiedenes	
Wein	viele Weintanks ohne Beschichtung haben sich bewährt; Geschmack der ersten Füllung kann beeinflußt werden, wenn Beton nicht mit Weinsteinsäure vorbehandelt wurde
Zellstoff-Brei	keine
Zucker	keine bei sorgfältig nachbehandeltem Beton und wenn trocken; Zuckerlösungen greifen an
Zyanidlösungen	zersetzen langsam

3.2 Erörterung

Natürlich vorkommende angreifende Chemikalien, wie Natrium-, Kalium- oder Magnesiumsulfat, finden sich manchmal im Untergrund oder in Wässern. Meerwasser ist schwach angreifend, vor allem wegen seines Sulfatgehaltes. Die Verbrennungsprodukte vieler Heizstoffe enthalten schweflige Gase, die mit Feuchtigkeit angreifende Säuren bilden. Heizgeräte beim Winterbau, die Kohlendioxyd entwickeln, sollen mit Abzug versehen werden, weil Kohlendioxyd einen ungünstigen Einfluß auf frische Betonflächen ausübt. Wasser aus Bergwerken und Industrierwässer können Säuren enthalten oder bilden. Die Zersetzung von Sulfidmineralien kann zu gelöstem FeSO_4 (Eisenvitriol) führen, das stark angreifend wirkt [23, 24]. Auch können Abwässer unter besonderen Bedingungen Säuren bilden. In Gegenden mit Moorböden finden sich gewöhnlich organische Säuren, schweflige Säuren und Sulfate, ferner können Kohlensäure und Schwefelwasserstoff auftreten. Gebirgswässer sind wegen des gelösten Kohlendioxyds manchmal sauer. Ihr Angriff bleibt gewöhnlich auf die Oberflächenschicht des Betons beschränkt oder setzt sich nur noch äußerst langsam fort, auch wenn der Zuschlag freigelegt ist. Beton, der landwirtschaftlicher Silage, tierischen Exkrementen und organischen Säuren aus dem Betrieb von Brauereien, Molkereien und Holzzellstoff-Fabriken ausgesetzt ist, wird manchmal an der Oberfläche angeätzt, besonders Beton-Fußböden. Die Schäden erreichen bei diesem harten Beton jedoch nicht solches Ausmaß, daß sie ernstlich die ganze Bodenkonstruktion gefährden können. Beton kann Wasser mit hohem Säuregehalt nicht ausreichend widerstehen. In Tafel 3 sind viele chemische Stoffe mit ihrer Wirkung auf Beton aufgeführt. Es sind verschiedene Fälle zu unterscheiden:

1. jene, bei denen schon eine besondere, auf den Beton gerichtete Sorgfalt die Beständigkeit oder einen noch angängigen, nur geringen Angriffsgrad sichert;
2. jene, bei denen eine Beschichtung vorzusehen ist. Eine besondere Anleitung über Schutzschichten ist in Vorbereitung (ACI Committee 616: „Beschichten von Beton“; siehe ferner Fußnote *) der Tafel 3).

3.3 Empfehlungen

In erster Linie ist der Beton selbst in besonderer Güte herzustellen, wie dies auch in der Einleitung und den dabei angeführten Quellen beschrieben ist. Beton, der Meerwasser ausgesetzt ist, soll aus Portlandzement mit nicht mehr als 8% Tricalciumaluminat (C₃A) hergestellt werden. ASTM-Zemente der Typen II, II A, IV, V, IS (MS) und IS-A (MS) genügen den Anforderungen; Zemente der Typen III und III A können so vorgeschrieben werden, daß sie ebenfalls genügen. Die üblichen Zementtypen I, IA, III und III A sind hier nicht ausreichend. Stahlbeton für Meerwasserbauten sollte mit Süßwasser und nicht mit Meerwasser angemacht werden. Zement für Beton in Böden mit 0,1 bis 0,2% wasserlöslichem Sulfat (SO₄) oder in Sulfatlösungen mit 150 bis 1000 mg SO₄ je l soll ebenfalls nicht mehr als 8% Tricalciumaluminat enthalten. Wenn der Sulfatgehalt in Böden oder Sulfatlösungen die angegebenen oberen Grenzwerte überschreitet, ist der C₃A-Gehalt des Zements auf höchstens 5% zu begrenzen. Zemente des Typs V nach ASTM genügen den Anforderungen, und die Zementtypen III und III A können dafür mit den erforderlichen Bedingungen vorgeschrieben werden.

In Anwesenheit von Säuren verhält sich keine der verschiedenen Portlandzement-Typen günstiger als die anderen. Doch kann die Lebensdauer des Betons durch Verwendung von Kalksteinzuschlag zur Neutralisierung eines Teils der Säure, der sonst ebenfalls den Zementstein angreifen würde, verlängert werden [25].

Eine chemische Behandlung des Abwassers oder eine ausreichende Fließgeschwindigkeit kann die Bildung von Schwefelwasserstoff, der zu schwefeliger Säure oxydiert, verhindern.

4. Verschleiß des Betons

Ein Verschleiß kann auf Böden oder Fahrbahndecken vom Fußgänger- oder Fahrzeugverkehr [26] herrühren oder von festen Teilchen, die mit Sand und Wasser an waagerechten oder senkrechten Flächen vorbeistreichen [27]^{*)}. So kann das Fahren mit Lastkarren in Lagerhäusern zu einer erheblichen Abnutzung führen [28]. Unter bestimmten Verhältnissen kommt dem Verschleiß baulich eine geringe Bedeutung im Vergleich zu Forderungen zu, die ein Betrieb oder eine Fertigung an staubfreie Luft stellt.

4.1 Erörterung

Versuche [29] und die Erfahrung der Praxis zeigen, daß die Druckfestigkeit die wichtigste Einzelgröße ist, die den Verschleiß eines bestimmten Betons beeinflusst. Druckfestigkeit und Verschleißwiderstand ändern sich umgekehrt mit dem Verhältnis von Hohlraumgehalt (Wasser und Luft) im Frischbeton zu Zementgehalt.

Eine zweite, sehr wichtige Größe ist der Verschleißwiderstand der an der Oberfläche anstehenden groben und feinen Zu-

^{*)} Anmerkung: Siehe dazu Fußnote ²⁾ auf S. 73.

schlagstoffe [30, 31]. Die Erfahrung lehrte, daß die Lebensdauer von Betonböden in einem Lagerhaus mit Lastkarrenverkehr durch Verwendung von besonders harten und festen Zuschlagstoffen wesentlich verlängert werden konnte. Der Einfluß verschieden harter Zuschlagstoffe tritt mehr bei Beton mit kleinerer Festigkeit hervor als in hochfestem Beton (720 kp/cm² und höher). Zuschlag mit kleinerem Größtkorn ist bei Böden für außerordentlichen Verkehr vorteilhaft. Ein zeitlich hinausgeschobenes Abscheiben und Glätten der frischen Oberfläche erhöht den Verschleißwiderstand. Er wird auch verbessert, wenn bei einem mechanischen Abscheiben⁹⁾ in die Oberfläche Zement und gut abgestufter Sand oder Zement und besonders hergestellte metallische Zuschlagstoffe eingearbeitet werden. Das Verfahren muß jedoch zweckentsprechend und zur richtigen Zeit angewendet werden, weil es sonst nachteilig wirken kann. Dieses als „Trocken-Streuen“ bekannte Vorgehen, das angewendet wird, nachdem der Beton zu versteifen beginnt und die Oberflächenfeuchtigkeit in den Beton eingesogen ist, sollte jedoch nicht mit dem völlig unzulänglichen Aufstreuen von Zement oder von Zement und Sand zum Aufsaugen von Überschußwasser auf der Oberfläche verwechselt werden; dadurch entsteht ein wasserreicher Mörtel mit niedriger Festigkeit und einer Oberfläche, die reißt und stark staubt.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für einen guten, verschleißfesten, nicht staubenden Boden oder eine entsprechende Fahrbahndecke ist eine angemessene Nachbehandlung [32].

Gegenüber einer nur 3 Tage lang feucht gehaltenen Betonoberfläche kann ein länger nachbehandelter Beton einen bis doppelt so hohen Verschleißwiderstand erreichen. Die Nachbehandlung soll so bald wie möglich nach der Fertigstellung beginnen und so lange wie möglich, im allgemeinen etwa 14 Tage lang, fortgesetzt werden. Das Nachbehandeln mit Sprühwasser oder feuchten Tüchern ist günstig, wenn der Beton dabei immer feucht bleibt. Wasserdichtes Papier sowie Kunststofffolien genügen, wenn der Beton unmittelbar vor dem Verlegen angeätzt wird und die überlappten Stöße mit wasserdichtem Band abgedichtet werden. Nachbehandlungsmittel¹⁰⁾ schließen die Feuchtigkeit im Beton ab, sind wirtschaftlich und leicht aufzutragen. Es ist angezeigt, den abgetrockneten Nachbehandlungsfilm mit festem Papier abzudecken, wenn der Boden begangen werden muß, bevor die Nachbehandlung beendet ist. Nachbehandlungsfilme sind jedoch für Böden, die später vergüfet, angestrichen oder mit irgendwelchen Belägen versehen werden, nicht empfehlenswert.

Nicht entlüftete Heizgeräte, die Kohlendioxyd erzeugen, sollten im Winterbau zum schnelleren Erhärten oder zur Sicherung gegen Frostschäden nicht eingesetzt werden, da Kohlendioxyd auf die Oberflächenhärte stark schädigend wirkt [33].

Flüssige Vergütungsmittel verbessern durch Verdichten und Härten die Oberfläche [34]; das Stauben wird vermindert und der

⁹⁾ Anmerkung: Mit sich drehendem, durch Motor angetriebenem Glätteller.

¹⁰⁾ Anmerkung: Aufgespritzte Filme, die das Verdunsten des Wassers aus dem frischen Beton hemmen.

Widerstand gegen einige Öle und Chemikalien erhöht. Sie sind wirksamer bei weniger oder mäßig festen Betonen und solchen, die zu früh oder zu ausgiebig geglättet oder nicht nachbehandelt wurden. Eine Vergütung dieser Art sollte mehr als eine Notmaßnahme betrachtet werden und weniger als eine zusätzliche Verbesserung eines an sich schon sachgemäß hergestellten Bodens oder als eine Möglichkeit, Beton geringerer Güte einzubauen. Wenn es sich darum handelt, ältere, sich abnutzende Böden oder staubende Böden zu verbessern, sind Vergütungsmittel sehr wirkungsvoll und erhöhen die Lebensdauer. Magnesium- und Zinkfluorsilicat (Fluate) oder Wasserglas sollen erst angewendet werden, wenn nach ordentlicher Nachbehandlung und folgendem Austrocknen der Boden 28 Tage alt ist. Diese Vergütungsmittel auf Silicatbasis werden zwei- oder mehrfach aufgetragen. Zum ersten Auftrag dient eine Lösung von etwa 0,12 kg Salz in 1 l Wasser, die weiteren bestehen aus einer Lösung von etwa 0,24 kg Salz in 1 l Wasser. Beim Auftragen sind bestimmte Schutzmaßnahmen nötig; Fluorsilicate (Fluate) greifen auch Farbe an und können auf farbigen Böden schwer entfernbare, weiße Ablagerungen hinterlassen. Jeder Auftrag sollte vor dem folgenden abtrocknen können; nach dem letzten muß die Oberfläche abgebürstet und mit Wasser abgeflobt werden.

Wasserglas (Natriumsilicat) ist sehr viskos und muß, abhängig von der Beschaffenheit des Silicats und der Porosität des Betons, mit Wasser verdünnt werden, damit es eindringt. Eine günstige Lösung entsteht, wenn Silicat von 42,5° Bé im Verhältnis von 1 l Silicat zu 4 l Wasser verdünnt wird. Es kann zwei- oder dreimal aufgestrichen werden; jeder Anstrich muß vollständig durchgetrocknet sein, wenn der nächste folgt. Abschrubben eines jeden erhärteten Anstrichs mit Wasser liefert bessere Voraussetzungen für einen folgenden Anstrich.

4.2 Empfehlungen

4.2.1 Es ist hochfester Beton zu verwenden mit niedrigem Wasserzementwert (höchstens 0,48), hohem Zementgehalt (mindestens 335 kg/m³),

angemessener feuchter Nachbehandlung (mindestens 7 Tage lang bei 21 °C, wenn Zement der Güte I, und 5 Tage lang, wenn Zement der Güte III benutzt wird¹¹⁾),

sauberem, gesundem und hartem Zuschlagstoff (ASTM Standard C 33 entsprechend),

zweckmäßigem Kornaufbau des feinen und groben Zuschlags (ASTM Standard C 33 entsprechend),

möglichst geringem Wassergehalt, bei dem eine angemessene Verarbeitung und Verdichtung möglich ist (2,5 cm Setzmaß für

¹¹⁾ Anmerkung: Die geforderte Mindest-Normenfestigkeit für Zement der Güte I liegt etwa zwischen der des Z 275 und Z 375 und für Zement der Güte III etwa zwischen Z 375 und Z 475 nach DIN 1164; siehe Walz, K.: Beton- und Zementdruckfestigkeiten in den USA und ihre Umrechnung auf deutsche Prüfverfe. beton 12 (1962) H. 9, S. 420/423, und H. 10, S. 463/466; ebenso Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 123/140.

Beton der Oberschicht und 7,5 cm, wenn einschichtig gearbeitet wird ¹²⁾),

geringstmöglichem Luftgehalt, der für die vorliegenden Bedingungen noch angemessen ist. Für Beläge, die mit Tausalzen bestreut werden, gelten die Luftgehalte nach Kapitel 2. Für Böden in Gebäuden oder für solche, die keinen strengen Witterungseinflüssen unterliegen, sind Luftgehalte von 3% oder weniger zu bevorzugen.

4.2.2 Das Abscheiben und Glätten ist so lange zu verschieben, bis der Beton nicht mehr glänzend-feucht oder kein freies Wasser mehr auf der Oberfläche erkennbar ist. In bezug auf die Fertigstellung schalungsfreier Betonflächen ist auch ACI 604-56 zu beachten [14] ¹³⁾:

Der Beton soll vorzugsweise durch Rütteln oder durch gleichwertig wirkende mechanische Geräte verdichtet werden; dabei soll das Setzmaß des Betons unter 5 cm liegen.

Beim Verdichten, Abziehen, Abscheiben und ersten Glätten soll der Beton nicht mehr als nötig bearbeitet werden.

Das abschließende Abscheiben und Glätten ist zeitlich soweit wie möglich hinauszuschieben. Es ist unwahrscheinlich, daß sich vorher auf der Oberfläche nochmals Wasser ansammelt, wenn eine zweckmäßige Zusammenstellung und Konsistenz des Betons gewählt worden ist.

Wasser auf der Oberfläche sollte mit Matten abgesaugt, abgeleitet oder mit einem an beiden Enden gehaltenen, darüber gezogenen Schlauch abgestreift werden, damit vor der Endbearbeitung die Oberfläche ohne Wasserfilm ist. Auf keinen Fall sollte irgendein Gerät für die Bearbeitung der Oberfläche eingesetzt werden, solange nicht das abgesonderte Wasser beseitigt worden ist. Zement soll zum Binden dieses Wassers nicht aufgestreut werden; nötigenfalls sind befriedigende Ergebnisse jedoch durch Einarbeiten von Trockenmörtel zu erzielen.

4.2.3 Es sind besonders harte Grobzuschlagstoffe zu verwenden, für einschichtige Böden bis 25 mm Größtkorn und für Oberbeton bei besonders hoher Beanspruchung bis 13 mm Größtkorn.

4.2.4 Wenn ein Aufstreuen und Einarbeiten von mineralischen oder metallischen Zuschlagstoffen vorgesehen wird, ist die Arbeitsanweisung des Herstellers zu befolgen. Der Zuschlagstoff ist sorgfältig auszuwählen, da eine strenge Einhaltung der Kornzusammensetzung und Kornform unbedingt erforderlich ist, insbesondere bei metallischen Zuschlagstoffen, damit in geeigneter Weise die ausreichende Menge Zuschlag eingebracht werden

¹²⁾ Anmerkung: Ein Setzmaß von 2,5 cm entspricht etwa einem knapp weichen Beton (Konsistenz K 2), ein solches von 7,5 cm etwa einem weichen Beton (Konsistenz K 3). – Über die Beziehung zwischen Setzmaß (ermittelt am 30 cm hohen Kegelstumpf) und Eindringmaß oder Ausbreitmaß nach DIN 1048 siehe Walz, K.: Das Messen mechanischer Eigenschaften des Frischbetons. Archiv für Technisches Messen (ATM) V 8246-1, Febr. 1948; Lieferung 153, Blatt T 33-48.

¹³⁾ Anmerkung: Im Original folgt der entsprechende Abschnitt wörtlich; hier werden aus ihm nur einige Angaben, die das Vorstehende ergänzen, wiedergegeben.

kann. Aus diesem Grunde ist es gewöhnlich wirtschaftlich, einen bewährten Lieferer, der auch eine Bauberatung vorsieht, heranzuziehen. Wird ohne solche Anleitung gearbeitet, so ist zu beachten, daß der Einstreustoff trocken sein soll, damit er mit Zement gemischt und gleichmäßig aufgebracht werden kann. Zwei Drittel der Menge sollen unmittelbar vor dem Abscheiben mit dem mechanischen Glätteller aufgestreut werden. Nach dem Einarbeiten ist das letzte Drittel rechtwinklig zur ersten Streurichtung aufzugeben. Wasser darf beim Einarbeiten nicht zugegeben werden; der Zement wird durch das aus dem Beton angesaugte Wasser befeuchtet.

4.2.5 Bei der Anwendung von Fluaten sind die unter 4.1 aufgeführten Angaben zu beachten.

5. Korrosion der Bewehrung

Beton schützt unter den meisten Bedingungen den Stahl sehr gut vor Korrosion. Die schützende Wirkung kann der hohen Alkalität und dem verhältnismäßig hohen elektrischen Leitwiderstand des Betons zugeschrieben werden. Der Grad des Schutzes ist in den meisten Fällen eine Funktion der Betonbeschaffenheit, der Stahlüberdeckung und der Bauausführung.

In diesem Kapitel werden das Vorgehen beschrieben, das normalerweise den erforderlichen Schutz abgibt, aber auch besondere Bedingungen, die zusätzliche Maßnahmen verlangen können, oder besondere Umstände, die zu Schwierigkeiten führen. Trotz des gewährleisteten Schutzes durch den Beton ist über eine beunruhigende Zahl von Fällen berichtet worden, in denen die Stahlkorrosion große Ausgaben für die Wiederherstellung und Unterhaltung der Konstruktion verursachte. Berichte über eine Beton- und Stahlzerstörung durch Stahlkorrosion stammen aus allen Teilen der Welt [35, 36, 37].

5.1 Korrosionsfördernde Bedingungen

Die Bedingungen, unter denen der Beton keinen dauernden Schutz bietet, werden unten besprochen und soweit möglich auch die zu ergreifenden Maßnahmen aufgeführt, um dadurch die Nutzungsdauer der Konstruktion zu verlängern. Diese Maßnahmen kommen zu denen, die naheliegend sein sollten, die aber oft unbeachtet bleiben, wie ausreichende Überdeckung, Vermeidung von Poren, günstige Betonmischungen und eine Bemessung zur Vermeidung von Rissen und Absprengungen.

Risse. Risse, die von der Oberfläche bis zum Stahl reichen, verschaffen Feuchtigkeit, Luft und Verunreinigungen Zutritt. Quer zur Bewehrungsrichtung verlaufende Risse geben, außer für sehr beschränkte Bereiche, nicht unbedingt zu ernstlicher Korrosion Anlaß [38]; wenn der Riß zu eng ist, kann die Korrosion örtlich begrenzt bleiben und nicht tief reichen. Andererseits können Risse, besonders wenn sie mit der Bewehrung gleichlaufend sind, den Zutritt korrosionsfördernder Stoffe in größerem Ausmaße ermöglichen und so den Angriff durch diese Stoffe beschleunigen sowie andere Ursachen für die Korrosion verstärken.

Carbonatisation. Hydratisierter Zement unterliegt einer chemischen Reaktion mit der Kohlensäure der Luft, die als Carbonatisierung bezeichnet wird. Sie fördert das Schwinden und das Trocknen des Betons und damit die Bildung von Rissen; sie vermindert jedoch auch die Alkalität und damit den Rostschutz. In guten, ausreichend verdichteten und nachbehandelten Beton dringt die Carbonatisierung nicht tief ein. Wahrscheinlich ist die Korrosion infolge Carbonatisierung nur bei durchlässigerem oder porigerem Beton oder dort, wo die Bewehrung nahe der Oberfläche liegt, von Bedeutung.

Verminderte Güte, z. B. durch Alkali-Zuschlagreaktion, Sulfatangriff und Frost-Tau-Wechsel. Durch solche Einwirkungen kann der Beton geschwächt oder rissig werden und dann die Bewehrung weniger schützen.

Elektrolyse. Der Durchfluß von Gleichstrom durch Beton oder durch die Bewehrung kann die Ursache für rasche und schwerwiegende Korrosion sein. Solcher Stromfluß ist häufig durch Stromaustritt und Versagen einer dauerhaften Erdung verursacht worden. In der Nachbarschaft von Gleichstromanlagen, einschließlich elektrischer Bahnen, soll diese Korrosionsursache immer in Betracht gezogen werden, besonders in Gegenwart eines Elektrolyts, wie z. B. von Natrium- oder Calciumchloridlösung im oder in Berührung mit dem Beton.

Korrosionselemente. Eine Korrosion kann durch einen im Beton selbst erzeugten Strom hervorgerufen werden. Elektrische Spannungsunterschiede können an verschiedenen Stellen des Stahlbetons durch unterschiedliche Feuchtigkeit, Sauerstoff- und Elektrolytkonzentration oder durch Berührung verschiedener Metalle auftreten. In einem solchen Beton wird ein Korrosionselement entlang eines Stahlstabes durch Bildung einer Anode aufgebaut, an der die Korrosion stattfindet, und einer Kathode, die nicht korrodiert. Der Abstand zwischen diesen beiden Teilen eines Elements kann von Bruchteilen eines cm bis zu 6 m und mehr reichen. Es liegt auf der Hand, daß die Schädigung der Konstruktion um so größer wird, je größer das elektrische Potential ist. Zur Bildung eines Korrosionselements gehören ein Elektrolyt und Feuchtigkeit. Doch kann ein Elektrolyt jede Substanz sein, die elektrischen Strom durch Ionenfluß zu leiten vermag, und feuchter Beton enthält von Natur aus genügend Elektrolyte für die Leitung eines Korrosionsstroms. Je trockener der Beton ist, desto geringer ist seine Leitfähigkeit. Gefahrenquellen ergeben sich aus einem Benetzen des Betons durch Wasser, das gelöste Salze enthält wie z. B. Meerwasser, durch sulfathaltiges Wasser, durch Chloride – von Tausalzen herrührend – und durch abtropfende Salzlauge aus Eisenbahnkühlwagen. Darüber hinaus können reichliche Salzmenge in den Beton gelangen durch salzhaltiges Anmachwasser, salzhaltigen Zuschlag oder durch großzügige Verwendung von Calcium- und Natriumchlorid oder von chloridhaltigen Zusatzmitteln an der Mischmaschine.

Aktive Korrosionselemente können zur Ruhe kommen, wenn der an der Kathode während des elektrochemischen Prozesses freigegebene Wasserstoff nicht durch Vereinigung mit einem anderen Element, wie mit dem aus der Luft verfügbaren Sauer-

stoff, abgeführt wird, sondern als solcher an Ort und Stelle bleibt. Alle Korrosionselemente können zu Stahlabtragungen führen. Die dadurch entstehende Querschnittsverminderung hat naturgemäß bei dünnen Bewehrungsgliedern ernstere Folgen als bei dicken Stäben. Kleine Korrosionselemente neigen mehr dazu, zur Ruhe zu kommen; sie sind im Übrigen allenfalls bei dünnen Bewehrungsgliedern bedenklich und verursachen außerdem weniger Absprengungen am Beton. Dagegen können große Korrosionselemente ernste Querschnittsverminderungen auch für dicke Stäbe verursachen, weil sie dazu neigen, aktiv zu bleiben. Außerdem kann dauernde Rostbildung in einem großen Korrosionselement genügend Druck zum Absprengen der Betonüberdeckung erzeugen. Abschließen gegen Luft durch Verwendung eines undurchlässigen Betons hoher Güte ist eine wirkungsvolle Maßnahme, um eine derartige Korrosion zu verzögern.

5.2 Schadensbild

Eine starke Stahlkorrosion ist gewöhnlich von einer Rißbildung oder in fortgeschrittenem Stadium von einem Absprengen der Überdeckung längs des Stahls begleitet. Bei weniger weit fortgeschrittenem Rosten können Rostflecke in Poren und feinen Rissen des Betons beobachtet werden. Bei gerissenem Beton weist der Rost häufig ein laminares Gefüge auf und am Stahl graue Farbe gegenüber der rötlichen beim Rosten an der Atmosphäre. Die Korrosion kann tiefe Abtragungen (Lochfraß) und eine erhebliche Querschnittsverminderung zur Folge haben. Aus den Erscheinungsmerkmalen kann jedoch nicht ohne weiteres auf Art und Ursache der Korrosion geschlossen werden. Elektrische Potentialmessungen über ein systematisch angelegtes Gitternetz waren für das Auffinden elektrischer Elemente und für die Lage der kathodischen und anodischen Bezirke von Nutzen. Zur Beurteilung der wahrscheinlichen Wirksamkeit von elektrischen Elementen dienen Messungen der elektrischen Leitfähigkeit des Betons.

5.3 Empfehlungen

Die Durchlässigkeit des Betons beeinflusst hauptsächlich den Korrosionsvorgang. Beton geringer Durchlässigkeit enthält unter bestimmten Umweltbedingungen auch weniger Wasser; seine elektrische Leitfähigkeit ist dann gering, und er verhindert auch das Eindringen von Salzen und des Sauerstoffes bis zur Bewehrung. Da mit kleineren Wasserzementwerten Beton kleinerer Durchlässigkeit entsteht, ist damit auch eine größere Sicherheit gegen Korrosion verbunden. Für ein günstigeres Verhalten des Betons beim Einbau und erhöhten Widerstand gegen das Eindringen von Wasser werden künstliche Luftporen empfohlen (LP-Beton). Bei Auslagerungsversuchen von bewehrten Pfählen mit 38 mm Betonüberdeckung wurde mit einem Wasserzementwert von 0,45 ein besserer Korrosionsschutz erzielt als mit dem Wasserzementwert von 0,62. Dieser bot nur geringe und ein Wasserzementwert von 0,53 eine mittelmäßige Schutzwirkung [37].

Ein Wasserzementwert von 0,40 sollte, mit Ausnahme von massigen Querschnitten, bei keinem Beton überschritten werden, der Meer- oder Brackwasser ausgesetzt wird oder der mit höheren Sulfat- oder Chlorid-Konzentrationen im Bereich der Wasser-

und Geländelinien in Berührung kommt. Das gleiche gilt für den Bereich schwankenden Wasserspiegels und den des Sprühwassers. Über diese Bereiche hinaus sollte 7,5 m hoch oder waagrecht auf 30 m der Wasserzementwert des Betons nicht über 0,49 liegen. Wenn besondere Versuchsergebnisse fehlen, kann Tafel 3 der ACI Standard 613-54 benutzt werden, um zu dem angesetzten Wasserzementwert den zugehörigen Zementgehalt zu ermitteln¹⁴⁾). Durch einen niedrigen Wasserzementwert allein entsteht jedoch nicht unbedingt ein undurchlässiger Beton; eine weitere Forderung ist ein günstig abgestuftes Zuschlaggemisch.

Calciumchlorid und andere lösliche Chloride sollten Spannbeton nicht zugesetzt werden [13, 39]. Die Benutzung von Calciumchlorid zu Stahlbeton für ungewöhnlich feuchte Umgebung ist ein Wagnis, gleichgültig ob wasserlösliche Salze in anstehenden Wässern oder Böden vorhanden sind oder nicht.

Die Durchlässigkeit wird mit zunehmender Hydratation des Zements stark vermindert; deshalb ist bei normaler Temperatur eine ununterbrochene Feuchtlagerung von wenigstens 14 Tagen zu fordern [40].

Fertigteile, die zur raschen Erlangung hoher Frühfestigkeit einer Wärmebehandlung mit Niederdruck-Dampf unterzogen werden, sollten zur Erhöhung der Undurchlässigkeit zusätzlich noch mindestens 7 Tage lang bei normaler Temperatur feucht gelagert werden [41].

Um bei der Ausführung einen Beton mit gleichmäßig geringer Durchlässigkeit zu erzielen, ist Entmischen zu vermeiden, Beton mit kleinem Setzmaß zu verwenden und der Beton durch Rütteln sowie durch Stochern entlang der Schalung durch und durch zu verdichten. Von überragender Bedeutung ist eine fortwährende Überwachung.

Der Widerstand gegen das Eindringen von Salzen bis zum Stahl hängt sowohl von der Undurchlässigkeit des Betons als auch von der Dicke der Überdeckung ab. Es ist allgemein anerkannt, daß Meeresbauten eine größere Überdeckung verlangen; sie wird für diese Umweltbedingungen zu mindestens 7,5 cm empfohlen. Die AASHO¹⁵⁾ empfiehlt eine Überdeckung von 10 cm mit Ausnahme bei vorgefertigten Pfählen¹⁶⁾.

¹⁴⁾ Anmerkung: Diese Tafel 3 enthält Richtwerte für den Wassergehalt des Betons, abhängig vom Größtkorn, Luftporengehalt und der Konsistenz.

¹⁵⁾ Anmerkung: American Association of State Highway Officials (Vereinigung der amerikanischen Straßenbaubeamten).

¹⁶⁾ Anmerkung: Im Entwurf der neubearbeiteten Stahlbetonbestimmungen (Proposed revision of building code requirements for reinforced concrete, ACI 318-56) finden sich die folgenden Mindestüberdeckungen; siehe Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) S. 145/276.

Üblicher Stahlbeton (Abschnitt 808):

- | | | |
|--|--|-------|
| a) Fundamente und andere wichtige Teile auf der dem Untergrund zugewandten Seite | | 75 mm |
| geschaltete, der Witterung ausgesetzte oder mit Boden bedeckte Betonflächen | | |
| bei Stabdurchmesser > 16 mm | | 50 mm |
| bei Stabdurchmesser ≤ 16 mm | | 38 mm |

(Fortsetzung umseitig)

Die Einflüsse auf Beton im Binnenland geben im allgemeinen keine Korrosionsprobleme auf, wenn sulfathaltiger Boden und Wasser außer Betracht bleiben. Doch können Tausalze durch den Beton der Fahrbahnplatten und den angrenzender Bauteile aufgenommen werden. In solchen Bereichen soll die Mindestüberdeckung 5 cm betragen und dafür gesorgt werden, daß das Wasser abgeleitet wird.

5.4 Hilfsmaßnahmen

Die Ausbesserung von Beton, der durch Rosten der Bewehrung geschädigt wurde, wird in Abschn. 7 behandelt; siehe auch [42]. Unter Verhältnissen, unter denen elektrochemische Wirkungen auftreten, können Ausbesserungen an einem Teil einer Konstruktion die Korrosion an anderen Teilen verschlimmern. Fortgesetzte Ausbesserung mag wohl die wirtschaftlichste Lösung sein, doch wird die einfache Ausbesserung eines geschädigten Teiles nicht unbedingt eine dauerhafte Schadensbehebung ergeben.

Mehrere Verfahren, eine Korrosion aufzuhalten oder zu verzögern, sind empfohlen [36] und versuchsweise erprobt worden [43]. Keines dieser Verfahren hat sich als voll ausreichend oder als wirtschaftlich herausgestellt. Eine vernünftige Anwendung wasserdichter Anstriche kann zur Verlängerung der Nutzungsdauer eines Bauwerkes dienen, doch kann deren wahllose Anwendung den Feuchtigkeitsstand im Beton erhöhen und so die Korrosion beschleunigen.

Ein kathodischer Schutz kann zu einer Veränderung der Bestandteile des hydratisierten Portlandzementes führen und dadurch den Beton oder die Haftung am Stahl beeinträchtigen. Abhilfe-

- b) an Flächen, die weder der Witterung ausgesetzt sind noch unmittelbar mit Boden in Berührung stehen:

Platten und Wände	19 mm
Balken und Unterzüge	38 mm
Rippendecken (Rippenabstand \leq 75 cm)	19 mm
- c) Umschnürungen oder Bügel in Stützen 38 mm
(und mindestens das 1,5fache des Größtkorns)
- d) In jedem Falle soll, mit Ausnahme von Platten und Rippendecken, die Überdeckung mindestens dem Stabdurchmesser entsprechen. In stark korrosionsfördernder Atmosphäre oder unter strengen Witterungseinflüssen ist die Überdeckung angemessen zu erhöhen.

Fertigteile (Abschnitt 2403):

- an Flächen ohne Witterungseinwirkung gleich dem Stabennendurchmesser, aber mindestens 16 mm
(im übrigen gilt Abschnitt 808)

Spannbeton (Abschnitt 2616):

- für Spannbeton, Hüllrohre und schlaffe Bewehrung:
- Flächen in Berührung mit dem Untergrund 50 mm
- Balken und Unterzüge

Spannstahl und schlaffe Hauptbewehrungsstäbe	38 mm
Bügel und Umschnürungen	25 mm
Platten und Rippendecken	
der Witterung ausgesetzt	25 mm
sonst	19 mm

maßnahmen dieser Art werden nur zur Erprobung empfohlen, wenn erschöpfende Untersuchungen durch Korrosionsfachleute vorausgingen. Die Erörterung einiger verwickelter Korrosionsursachen und die zweifelhafte Dauer von Verbesserungen unterstreichen die Bedeutung einer guten konstruktiven Durchbildung, der Verwendung von Beton hoher Güte, eines sorgfältigen Einbringens und Nachbehandelns des Betons und einer guten Überwachung. Die besten Mittel, um Stahlkorrosion zu verhindern, und die besten Hilfsmaßnahmen sind in erster Linie eine pedantisch genaue Einhaltung guter Konstruktions- und Betoniergrundsätze. Es gibt viele, viele Stahlbetonbauten, die sich ausgezeichnet verhalten, obwohl sie in ungünstiger Umgebung liegen. Es ist aber ein schwieriges und unsicheres Unternehmen, die Korrosion aufzuhalten, wenn die Bedingungen für ihre Entstehung bereits in das Bauwerk eingebaut wurden.

6. Reagierende Zuschlagstoffe

Es ist festgestellt worden, daß die chemische Reaktion von Zuschlagstoffen im Beton eine bedeutende Auswirkung auf seine Beständigkeit haben kann. Obwohl manche Reaktionen nützlich sein können, haben andere eine ernste Schädigung durch ungewöhnliche Dehnung, Ribbildung und durch Festigkeitsrückgang zur Folge.

6.1 Erörterung

Die verbreitetste Reaktion, der auch die meiste Aufmerksamkeit gewidmet wurde, ist jene zwischen den Alkalien des Zementes (Na_2O und K_2O) oder Alkalien anderer Herkunft und bestimmten kieselsäurehaltigen Bestandteilen im Zuschlag. Diese Erscheinung wird im allgemeinen als „Alkali-Zuschlagreaktion“ bezeichnet.

In Kansas und Nebraska unterlag Beton aus bestimmten Kiesanden einer Zerstörung, die allgemein einem chemischen Vorgang zugeschrieben worden ist. Doch steht diese Zerstörung in keiner einfachen Beziehung zum Alkaligehalt des Zementes; sie ist auch mit dem Zement veränderlich. Der Sachverhalt ist im einzelnen noch nicht geklärt. Zur Unterscheidung dieser Erscheinung von der Alkali-Zuschlagreaktion wird hierfür im allgemeinen – wie auch im folgenden – die Bezeichnung „Zement-Zuschlagreaktion“ benutzt.

Bei einer anderen schädigenden Reaktion sind mehr carbonathaltige als kieselige Zuschlagstoffe beteiligt. Die Reaktion ist noch nicht ausreichend erklärbar. Doch besagen die bisherigen, begrenzten Belege, daß dabei gewisse tonhaltige, dolomitische Kalksteine beteiligt sind, die mit den Alkalien des Zementes reagieren und zum Treiben des Zuschlags führen. Verdächtige Zuschlagstoffe sind solche, die etwa aus gleichen Teilen Calcit und Dolomit bestehen. Solche Zuschlagstoffe sind verhältnismäßig selten; sie verursachten jedoch ernste Schäden in Kingston, Ontario, Kanada und können auch in einigen Gebieten von Iowa und Indiana für eine Betonzerstörung verantwortlich sein.

Zu diesen drei schädlichen chemischen Zuschlagreaktionen kommen noch die Oxydation und Hydratation bestimmter instabiler

Mineralstoffe, Sulfate oder Sulfide (z. B. des wasserfreien Magnesiumoxyds, Calciumsulfats oder die Oxydation des Pyrits). Durch eine sorgfältige Prüfung und Beurteilung der Zuschlagstoffe können gewöhnlich solche reagierenden Bestandteile erkannt und ihre Verwendung zu Beton vermieden werden.

6.2 Empfehlungen (Richtlinien)

Im folgenden sollen wegen ihrer größeren Bedeutung nur die zuerst genannten drei Reaktionen näher betrachtet werden.

6.2.1 Alkali-Zuschlagreaktion

a) *Vorkommen.* Es stehen Karten und Unterlagen zur Verfügung, aus denen die Gebiete in den USA mit verdächtigen Zuschlagstoffen hervorgehen [44]. Am häufigsten kommen solche Zuschläge in der westlichen Hälfte der USA vor.

b) *Nachweis durch Laboratoriumsprüfungen.* Für Zuschlagstoffe aus neuen Aufschlüssen oder für einen Zuschlagstoff, für den nach Feststellungen aus der Praxis die Möglichkeit einer Reaktion besteht, sollten Prüfungen durchgeführt werden. Die zweckmäßigsten sind:

1. *Petrographische Prüfung.* Die ASTM Standard C 295 bietet ein bewährtes Verfahren zur petrographischen Zuschlagprüfung [45]. Die Mineraltypen, mit denen eine Alkali-Zuschlagreaktion verbunden ist, sind zusammengestellt [44] und die Verfahren zur Erkennung derselben beschrieben worden [46]. Dazu gibt es Richtlinien für den noch zulässigen größten Gehalt an reagierenden Mineralien [47, 48].

2. *Prüfung einer möglichen Reaktion mit Hilfe von Mörtelprismen.* Dieses Verfahren nach ASTM Standard C 227 ist das allgemein verlässlichste zur Ermittlung einer möglichen Alkali-Reaktion. Beurteilungsmerkmale zur Auswertung dieser Prüfung für die Abnahme gibt ASTM Standard C 33. Das Verfahren dient nicht nur der Zuschlagbeurteilung, sondern auch der Beurteilung bestimmter Zement-Zuschlag-Kombinationen.

3. *Chemische Prüfung auf eine mögliche Reaktion.* Dieses Verfahren nach ASTM Standard C 289 wird hauptsächlich zur raschen Beurteilung benutzt, da die Ergebnisse in wenigen Tagen vorliegen, bei der Mörtelprüfung dagegen erst in 3 bis 6 Monaten. Beurteilungsmerkmale nach diesem Versuch enthält ASTM Standard C 33. Die Auslegung der Versuchsergebnisse verlangt besondere Sorgfalt; Einzelheiten hierzu enthalten der Highway Research Board Special Report Nr. 31 [44] und das Highway Research Bulletin 239 [49].

c) *Hauptanhaltspunkte zur Beurteilung der Reaktionsfähigkeit.* Wenn aus der Praxis das Verhalten eines bestimmten Zuschlags bei Verwendung mit Zement hohen Alkaligehalts bekannt ist, so bietet dies die beste Möglichkeit, sein Reaktionsvermögen zu beurteilen [44]. Sind solche Feststellungen nicht verfügbar, so liefert die petrographische Prüfung, unterstützt durch Feststellungen aus der Mörtelprüfung oder der Betonprüfung (obwohl diese nicht genormt ist), das zuverlässigste Kriterium [48]. Auch die Ergebnisse der chemischen Prüfung sollten zusammen mit

denen der petrographischen benutzt werden. Es ist gefährlich, bei irgendeiner Beurteilung sich nur auf die Ergebnisse von einer Prüfung zu verlassen [48].

d) *Vorgehen bei Zuschlagstoffen mit Alkali-Reaktion.* Zuschlagstoffe, bei denen eine Reaktion möglich ist, sollten für Beton, der Meerwasser oder Alkalien ausgesetzt wird, nicht verwendet werden, wenn andere Zuschlagstoffe irgendwie beschaffbar sind [44]. Wenn reagierende Zuschlagstoffe benutzt werden müssen, so darf dies nur geschehen, wenn mit eingehenden Prüfungen und möglichst auch praktischen Beobachtungen festgestellt wurde, daß durch eine sachdienliche Begrenzung des Alkaligehalts des Zements, durch Zusatz einer zweckmäßigen Menge eines wirkungsvollen Puzzolans oder durch beides ein befriedigendes Verhalten erwartet werden kann. Folgende Sicherungsmaßnahmen sind dabei anzuwenden.

1. Zement mit niederem Alkaligehalt (max. 0,6%, als Na_2O ausgedrückt). Als Anmachwasser darf Meerwasser oder alkalihaltiges Grundwasser nicht verwendet werden.

2. Sind Zemente mit niederem Alkaligehalt wirtschaftlich nicht zu beschaffen, so ist ein geeigneter mineralischer Zusatzstoff oder eine Puzzolane, wie in ASTM Standard C 402 vorgeschrieben, zu benutzen. Die Wirksamkeit mineralischer Zusatzstoffe ist nach ASTM Standard C 441 zu prüfen. Immer wenn ein Puzzolan-Zusatz beabsichtigt ist, sollte man sich daran erinnern, daß dadurch unter ungewöhnlichen Trocknungsbedingungen oder bei Wechseln zwischen Trocknen und Durchfeuchten die Schwindung des Betons erhöht werden kann. Auch die Festigkeitsentwicklung eines solchen Betons kann dadurch ernstlich gehemmt werden. Daraus folgt, daß der Aufbau und die künftige Umgebung des Betons sorgfältig berücksichtigt werden sollten, bevor Puzzolane zugesetzt werden.

6.2.2 Zement-Zuschlagreaktionen

a) *Vorkommen.* Kiessande im Gebiet von Kansas, Nebraska und Wyoming, insbesondere im Bereich des Platte-, Republican- und Laramie-River, stehen mit Betonzerstörungen in Verbindung, die der Zement-Zuschlagreaktion zugeschrieben werden.

b) *Nachweis durch Laboratoriumsprüfungen.* Um eine mögliche Schädigung auszuweisen, sind die folgenden besonderen Prüfverfahren aufgestellt worden.

1. *Betonprüfung.* Sie umfaßt Wechsel zwischen Erhitzen, Trocknen, Abkühlen und Wasseraufsaugen. Eine Dehnung von 0,07% oder mehr nach einem Jahr (285 Zyklen) zeigt die Möglichkeit einer schädlichen Zement-Zuschlag-Kombination an [44, 50].

2. *Beschleunigte Betonprüfung.* Sie besteht aus Wechseln zwischen Erhitzen und Abkühlen unter dauerndem Besprühen mit Wasser. Ein Zyklus dauert 45 min [44, 51].

3. *Mörtelprüfung gemäß ASTM Standard C 342.* Nach ASTM Standard C 33 wird eine Dehnung von 0,2% oder mehr in einem Jahr als unbefriedigend angesehen.

c) *Hauptanhaltspunkte zur Beurteilung der Reaktionsfähigkeit.* Beurteilungsmerkmale für eine Zement-Zuschlag-Kombination

liefert jede der Prüfungen; sie sind nützlich, jedoch nicht unfehlbar. Von den drei aufgeführten Prüfungen ist nur die Mörtelprüfung als ASTM Standard herausgekommen; sie ist am einfachsten auszuführen und zu deuten. Wie auch bei anderen Zerstörungsarten sind Feststellungen aus der Praxis als beste Beurteilungsunterlagen anzusehen. Doch gehört jede Feststellung nur zu der betreffenden Zement-Zuschlag-Kombination. Das gute Verhalten eines bestimmten Betons aus dem Zuschlag und einem Zement läßt nicht ohne weiteres ableiten, daß dies für den Zuschlag auch mit anderen Zementen und Betonarten zutrifft.

d) *Vorgehen bei möglicherweise schädlichen Zement-Zuschlag-Kombinationen.* Wenn eine Verwendung aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu umgehen ist, sollten 30 Gew.-% oder mehr Kalksteinsplitt zu der Zement-Zuschlag-Kombination gegeben werden. Mit Betonprüfungen ist festzustellen, ob die sich ergebende Zusammensetzung zufriedenstellend ist [44, 50, 51].

6.2.3 Reaktion carbonathaltiger Zuschlagstoffe

a) *Vorkommen.* Bei gewissen, an wenigen Stellen in den USA und in Kanada gefundenen dolomitischen Kalksteinen wird vermutet, daß sie einer Reaktion zugänglich sind.

b) *Nachweis durch Laboratoriumsprüfungen*

1. Petrographische und chemische Untersuchungen auf Ton-, Calcit- und Dolomitgehalt. Zuschlag, der etwa gleiche Teile Calcit und Dolomit enthält, ist weiter wie nachfolgend angegeben zu prüfen [52].

2. Dehnung von Prismen 38 mm · 38 mm · 146 mm aus dem Zuschlag bei Lagerung in einer 2 m-Alkalihydroxydlösung aus gleichen molaren Teilen NaOH und KOH [53]. Vergleichsprüfungen sind mit bekannt gutem Kalkstein durchzuführen. Während für zuverlässige Kennwerte zur Beurteilung der Prüfergebnisse noch weitere Untersuchungen nötig sind, sollte einstweilen Gestein, das eine lineare Dehnung von 0,03 bis 0,04 über jener des Vergleichszuschlags im Alter bis zu 10 Monaten erreicht, als verdächtig angesehen werden.

c) *Hauptanhaltspunkte zur Beurteilung der Reaktionsfähigkeit.* Für diese kürzlich als eine spezifische Erscheinung festgestellte Reaktion stehen noch keine begründeten Beurteilungsmerkmale fest. Wenn Zweifel bestehen, sollte der Prismenversuch ausgeführt werden.

d) *Vorgehen bei reagierenden carbonathaltigen Zuschlagstoffen.* Zur Zeit können keine anerkannten Verbesserungsmöglichkeiten angegeben werden. Obwohl man sich von Mischungen aus Zement mit extrem niedrigem Alkaligehalt (vielleicht 0,1 bis 0,2 %, als Na₂O) etwas verspricht, sollten doch solche Zuschlagstoffe noch vermieden werden.

6.3 Erhaltung von Beton aus reagierenden Zuschlagstoffen

Verfahren, um einen Beton, der reagierende Bestandteile enthält, zu erhalten, sind nicht bekannt. Wasser oder Feuchtigkeit ist teilweise bei wenigstens zwei der Reaktionen beteiligt. Darüber hinaus wirken Gefrieren und Tauen nach beginnender

Zerrüttung durch diese chemischen Reaktionen verstärkt ein. Daher kann jede gangbare Möglichkeit, die Wassereinwirkung auf solchen Beton zu vermindern, dessen Lebensdauer verlängern.

7. Instandsetzung geschädigten Betons

7.1 Beurteilung des Schadens

Um die Schwere eines Schadens beurteilen zu können, ist zunächst festzustellen, wodurch der Schaden entstand. Besondere Sachkenntnis ist dann nötig, um die Art und das Ausmaß der Wiederherstellung festzulegen. Wenn minderwertiger Beton durch gemäßigte Witterungseinwirkungen geschädigt wurde, wird die Ausbesserung durch zweckentsprechenden Beton eine dauerhafte Lösung sein. Zerstörungen an hochwertigem Beton durch sehr stark angreifende Umweltbedingungen verlangen dagegen besondere Maßnahmen; in diesem Falle ist entweder ein noch besserer Beton nötig, oder die Umwelteinwirkungen müssen geändert werden (Entwässerung, Schutz gegen Tausalz-zutritt, gegen mechanische Beanspruchung usw.). In jedem Falle ist die Entfernung allen schadhaften Betons die erste und wahrscheinlich wichtigste Voraussetzung für eine dauerhafte Wiederherstellung. Jeder auch nur fragliche oder mäßig dichte Beton muß entfernt werden, weil sonst die Ausbesserung nicht erfolgreich sein wird. Wenn nicht alle Einflüsse, die das Aussehen (Gefüge, Farbe) der Ausbesserung bestimmen, angemessen beachtet werden, wird sie wahrscheinlich unschön ausfallen. Durch Zusatz weißen Zements kann man die Farbe der Flickstelle mit der des alten Betons in Einklang bringen. Eine Flickstelle in einer Schalungsfläche sollte auch nie mit einer Stahlkelle geglättet werden, weil sie dadurch eine dunkle, nicht mehr zu beseitigende Färbung annimmt. Das Verfahren zur Ausbesserung eines Bauteils hängt weitgehend von den Abmessungen der Schadensstelle ab. Im folgenden sind gebräuchliche Verfahren und die Bedingungen für deren Wahl aufgeführt.

7.2 Auswechseln des Betons

Wenn die ausgebrochenen Löcher sich durch die ganze Wand oder bis hinter die Bewehrung erstrecken, ist ein in der Maschine gemischter Beton geeigneter Konsistenz und Zusammensetzung einzubauen. Er bildet mit dem noch vorhandenen Beton dann eine Einheit [56]. Solche Arbeiten sollen bei Neubauten, z. B. zur Ausbesserung von Nestern, unmittelbar nach dem Entschalen ausgeführt werden. Ein über die mangelhaften Partien hinausgehendes Ausstemmen kann nötig werden, um eine ausreichende Schichtdicke, gewöhnlich 15 cm oder mehr, und um eine geeignete Form der Ausbruchstelle zu erhalten. Ausbrüche in senkrechten Flächen sollen gemäß den Bildern 1 und 2 aufweisen:

- a) am Umfang möglichst keine Kantenabbrüche oder spitz zulaufende Kanten,
- b) senkrechte Seitenflächen und waagerechte Begrenzungslinien zur Wandfläche,

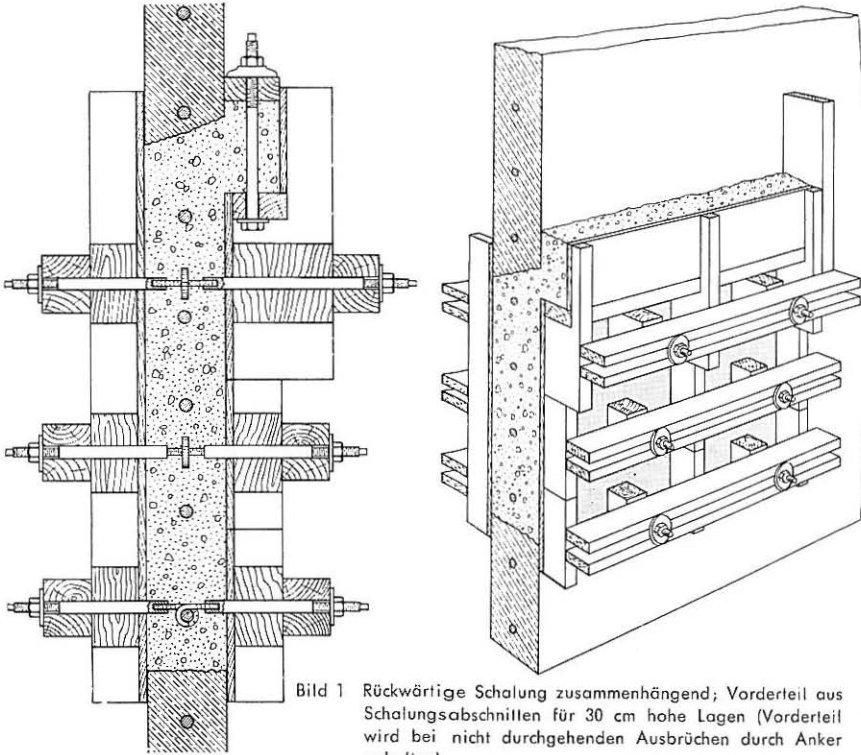


Bild 1 Rückwärtige Schalung zusammenhängend; Vorderteil aus Schalungsabschnitten für 30 cm hohe Lagen (Vorderteil wird bei nicht durchgehenden Ausbrüchen durch Anker gehalten)

- c) zur Schalungsfläche im allgemeinen rechtwinklig liegende Flächen, mit Ausnahme der oberen Begrenzungsfläche, die zur Vorderkante etwa 1 : 3 ansteigt,
- d) soweit noch nötig Kerben, um den eingesetzten Beton in den Bauteil einzubinden,
- e) genügende Tiefe hinter Bewehrungsstäben, wenigstens 2,5 cm,
- f) ausgerundete innere Ecken (Halbmesser mindestens 2,5 cm).

Bei der Instandsetzung von Platten wird im allgemeinen eine Säge eingesetzt, um am Umfang saubere Kanten zu erhalten. Wenn möglich, sollen die Sägeschnitte jedoch mit geringer Neigung schräg nach unten und außen ausgeführt werden (Bodenfläche größer als obere Fläche), damit eine verkeilende Wirkung erzielt wird. Die Flächen müssen durch eine Wasser-Sandstrahl-Behandlung oder ein anderes gleichwertiges Verfahren gründlich gereinigt werden; hierauf folgt noch ein abschließendes Waschen mit dem Preßluft-Wasserstrahl oder einem scharfen Wasserstrahl. Häufig werden Dübel und Bewehrungsstäbe angeordnet, um die ausgeflickte Partie mittragend zu machen oder sie mit dem anstehenden Beton zusätzlich weiter zu verankern.

Für massige Ausbesserungen in senkrechten Flächen ist gewöhnlich eine Schalung nötig; sie muß dicht und fest sein. Der Vorderteil der Schalung sollte mit dem Einbringen des Betons so hochgeführt werden, daß er in höchstens 30 cm ho-

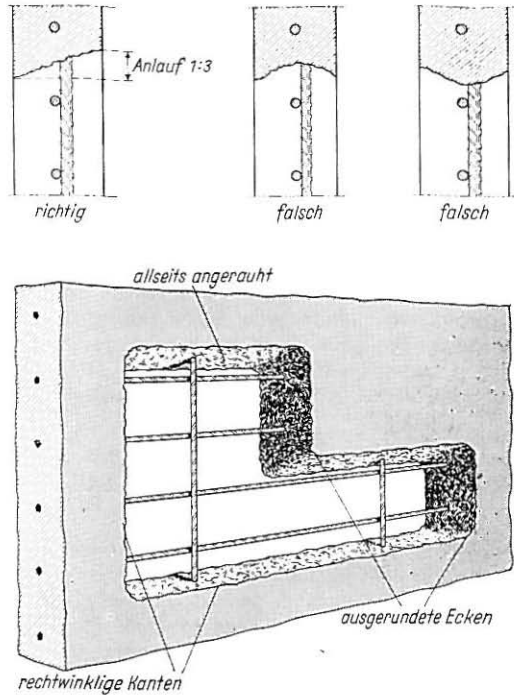


Bild 2 Richtige und falsche Ausbildung von Durchbrüchen

hen Lagen bequem eingebaut werden kann. Die Anbindefläche soll zum Zeitpunkt des Anbetonierens trocken sein. Sie wird zuerst mit einer dünnen, bis rd. 3 mm dicken Mörtelschicht versehen (Mörtel aus Sand 0 bis 1 mm; gleicher Wasserzementwert wie der einzubringende Beton). Die besten Ergebnisse werden beim Auftragen des Mörtels mit Druckluft erzielt, doch ist ein Spritzwurf oder ein Einreiben von Hand ebenfalls ausreichend. Unmittelbar anschließend ist der Beton einzubringen, der im allgemeinen hinsichtlich Größtkorn und Wasserzementwert dem des alten Betons entsprechen soll. Das Setzmaß liegt üblicherweise zwischen 5 und 7,5 cm, doch soll für den oberen Teil von mehrlagig zu füllenden Ausbrüchen ein steiferer Beton verwendet werden. Jede Lage ist gründlich, wenn irgend möglich mit Innenrüttlern zu verdichten. Zwischen dem Betonieren einzelner Lagen sollen mindestens 30 min verstreichen.

Die ausbetonierte Partie wird besonders dicht, wenn am oberen Teil der vorderen Schalungsfläche nach Bild 1 ein trichterartiger Aufsatz angebracht, gefüllt und von dort während des Rüttelns der Schalung Druck auf den Beton ausgeübt wird. Rütteln und Nachpressen sind alle 30 min zu wiederholen, bis der Beton weitgehend erstarrt ist und nicht mehr auf das Rütteln anspricht.

Ebenfalls mit der Absicht, eine dichtere Ausfüllung zu erreichen, wird dem Beton manchmal Aluminiumpulver zugesetzt. Dadurch kommt die Füllung unter allseitigen Druck; Pausen

zwischen dem lagenweisen Betonieren sind dabei nicht nötig. Die Schalung muß nach dem Einbringen des Betons geschlossen und besonders stark ausgesteift werden, um ein Herausquellen des Betons zu verhindern. Nach dem Füllen der Schalung sollte nicht mehr gerüttelt werden. Die Anwendung von Aluminiumpulver, möglichst nach vorausgehenden Laboratoriumsversuchen mit dem vorgesehenen Beton, sollte einer strengen Überwachung unterliegen; das Pulver soll in keinen größeren Mengen als 2,5 bis 3,5 g je 50 kg Zement zugesetzt werden. Einige Ingenieure erzielten auch günstige Ergebnisse mit Mörtel oder Beton, der Gemische aus Eisenpulver und einem Oxydationsmittel enthielt. Dabei wird angenommen, daß das normalerweise eintretende Schwinden durch die mit der Oxydation verbundene Quellung ganz oder teilweise aufgehoben wird. Doch schließt die Verwendung solcher Stoffe die Gefahr einer Rostverfärbung oder eines zunehmenden Absprengens ein.

Ausgußbeton, der gut anbindet und wenig schwindet, kann bei bestimmten Ausbesserungen vorteilhaft eingesetzt werden; er hat sich auch als Unterwasserbeton bewährt [54].

7.3 Instandsetzung abgeschieferter Flächen

Solche Flächen können durch dünne Betonbeschichtungen zufriedenstellend instand gesetzt werden, wenn für eine gute Haftung der Flickschicht gesorgt wird; die Haftung hängt überwiegend von der Oberflächenbeschaffenheit des alten Betons ab [58, 59]. Derselbe muß gesund, haltbar und sauber sein. Die Temperatur des neuen Betons sollte der der auszubessernden Platte so nahe wie möglich kommen. Ein auf eine kalte Platte aufgetragener warmer Beton haftet schlecht, weil er sich beim Abkühlen verkürzt und dadurch von der Platte lösen kann. Die angegriffene Fläche wird zuerst mit einem ungefähr 2,5 cm tiefen Sägeschnitt abgegrenzt und dann der geschädigte Beton mechanisch ausgebrochen. In jedem Falle ist eine Schichtdicke von wenigstens rd. 4 cm nötig. Preßluftmeißel müssen vorsichtig eingesetzt werden, damit tiefreichende Zertürmungen vermieden werden. Sandstrahlen ist ausreichend, wenn keine tiefe Bearbeitung nötig ist. Die anschließende Reinigung kann ausreichend mit einem kräftigen Preßluft-Wasserstrahl oder Wasserstrahl vorgenommen werden, doch ist eine Salzsäurebehandlung vorzuziehen. Bei gesundem Beton ist diese allein ausreichend. Auch nach der Salzsäurebehandlung müssen die entstandenen Ablagerungen und losen Sandkörner durch Waschen und kräftiges Bürsten vollständig entfernt werden.

Sofern der Beton nicht sehr steif ist, entsteht die größte Haftung, wenn die Fläche beim Aufbetonieren trocken ist. Ist eine lange Trockenperiode vorausgegangen, so sollte der Beton befeuchtet werden, jedoch vor dem Aufbetonieren wieder oberflächlich abtrocknen.

Zunächst ist eine etwa 3 mm dicke Schicht aus 1 Teil Zement und 1 Teil Sand 0/1 mm sorgfältig und gleichmäßig einzubürsten, so daß auch Luftporen verdrängt werden. Die Mörtelschicht soll nur soweit vorgezogen werden, daß sie sich bis zum Aufbetonieren infolge Abtrocknens nicht verfärbt. (Bei heißem, trockenem Wetter ist der alte Beton kurz vor dem Ein-

bürsten des Mörtels durch leichtes Besprühen anzufeuchten.) Für die Betonbeschichtung ist hochwertiger LP-Beton, im allgemeinen mit einem Größtkorn von $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der Schichtdicke, zu verwenden. Die Mischung sollte steif angemacht sein (Setzmaß etwa 1 cm) und sorgfältig von Hand verdichtet werden. Fugen im alten Beton sind durch die neue Schicht hindurchzuführen.

Senkrechte oder geneigte Flächen können bei sachgemäßem Vorgehen wirtschaftlich und schnell durch dünne Lagen von Druckluft-Spritzmörtel zufriedenstellend ausgebessert werden (vorherige Entfernung des mangelhaften Betons oder auch gesunden Betons, damit wenigstens eine 4 cm dicke, bei großen Flächen 5 cm dicke Schicht aufgetragen werden kann; nach außen geneigte Flächen des Ausbruchs anordnen, damit keine durch Rückprall abgesonderten Bestandteile eingebettet werden; Reinigung der Oberfläche mit Preßluft-Wasserstrahl). Bei der Verfahrenstechnik nach ACI Standard 805 [60] wird Spritzmörtel 1 : 4 verwendet. Auf großen Flächen oder solchen, die starker Beanspruchung ausgesetzt sind, wird eine Baustahlmatte (Maschenweite 5 cm, $d = 3,8$ mm) durch Dübel am alten Beton befestigt.

7.4 Ausbesserung von Absprengungen

Absprengungen reichen unterschiedlich tief; sie können an Fugen von Betondecken vorkommen und ähnlich wie abgeschieferte Flächen ausgebessert werden, ebenso mit Epoxyharz, einem rasch erhärtenden und ausgezeichnet haftenden Stoff [55]. Das Harz dient als Haftanstrich anstelle einer Vorbehandlung mit Zementmörtel oder als Bindemittel für Mörtel und Beton anstelle von Zement¹⁷⁾.

Es gibt große Unterschiede in der Festlegung und den Eigenschaften von Epoxyharz-Gemischen; daher sollte nur ein auf die jeweilige besondere Anwendung abgestimmtes Erzeugnis verwendet und wenn möglich vor Anwendung ein Nachweis über zufriedenstellendes Verhalten verlangt werden. Viele Epoxybinde weisen thermische Eigenschaften auf, die von denen des Betons stark abweichen. Daher sollte das Ausmaß der Ausbesserung auf einige Dezimeter beschränkt bleiben, sofern es nicht sicher ist, daß auf diese Einschränkung verzichtet werden kann. Im übrigen gilt für das Ausflicken das gleiche wie bei der

¹⁷⁾ Wegen weiterer Einzelheiten über Epoxy-Massen siehe ACI Committee 403: Guide for use of epoxy compounds with concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) No. 9, S. 1121/1142. — Anmerkung: Einschlägige Auszüge aus der amerikanischen Literatur siehe

Walz, K.: Verwendung von Epoxyharz zum Beschichten und Kleben von Beton in den USA. beton 12 (1962) H. 5, S. 215/217; ebenso Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 73/78.

Ref. Walz, K.: Leim! Zur Instandsetzung von Beton. Straße und Autobahn 13 (1962) H. 6, S. 223 (nach Wakeman, C. M., H. E. Slover und E. N. Blye: Glue! For concrete repair. Materials Research & Standards 2 (1962) No. 2, S. 93/97).

Walz, K., P. Misch und H. H. Schönrock: Beton in den USA. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 30, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 43 ff.

Walz, K.: Eine amerikanische Anleitung für die Verwendung von Epoxyharz-Gemisch bei Beton. Bau- und Bauindustrie 16 (1963) H. 5, S. 203/204 (behandelt Bericht des ACI Committee 403).

Mörtel-Vorbehandlung (Entfernung minderwertigen Betons usw.). Die Betonfläche soll beim Auftrag des Binders trocken sein; ein Sägeschnitt zur Randbegrenzung ist hier nicht unbedingt erforderlich. Epoxy-Klebeschichten werden mit Schrubbern, Walzen oder billigen Bürsten in einer Filmdicke von knapp 1 mm aufgetragen.

Epoxy-Beton wird eingedrückt oder eingestampft und die Oberfläche durch Abziehen und Glätten abgeglichen. Bei der Nachbehandlung ist nur eine angemessene Temperatur für die chemische Reaktion sicherzustellen.

Epoxyharz-Gemische sind ziemlich teuer, erfordern besondere Aufmerksamkeit beim Mischen, sind schwierig zu bearbeiten und giftig [55]. Optimale Ausführungen werden mit erfahrener Personal erhalten oder wenn die Arbeiten wenigstens von solchem überwacht werden.

7.5 Druckluft-Spritzmörtel

Das Spritzverfahren ist für Oberflächenausbesserungen und solche mit unregelmäßigen Umrissen gebräuchlich [60, 61]. Auf senkrechten oder nahezu senkrechten Flächen wird bei Ausbesserungen bis 1,2 cm Dicke in einer Lage aufgetragen, darüber in mehreren Lagen und einem zeitlichen Abstand von 30 min. Auf waagerechten Flächen kann in Lagen bis zu 5 cm Dicke aufgetragen werden. Bewehrungsstäbe, verschieden große Vertiefungen oder unregelmäßige Löcher verlangen eine genaue Düsenführung, damit alle Hohlräume gefüllt werden und eine gute Haftung gesichert ist. Die Nachbehandlung ist mit äußerster Sorgfalt auszuführen. Wenn die Farbe der Flickstelle ohne Bedeutung ist, werden mit Nachbehandlungsfilmen nach vorausgehender mehrstündiger Feuchtbehandlung zufriedenstellende Ergebnisse erzielt.

7.6 Oberflächenbeschichtung

Eine Oberflächenbeschichtung wird zum Schutz gegen Umwelteinwirkungen, für gleitsichere Flächen oder aus ästhetischen Gründen aufgebracht.

Als Aufstrich sind Erdöle verwendet worden, doch ist ihre Wirkung nur vorübergehend, weil sie durch Witterung und Verkehr rasch abgetragen werden. Gekochtes Leinöl hat sich zur Versiegelung der Oberfläche als wirksam erwiesen. In den vergangenen Jahren sind Oberflächen auch mit Siliconen behandelt worden; ihr Nutzen ist jedoch umstritten (Einzelheiten siehe in den Abschnitten 1 und 2).

Beschichtungen auf Epoxyharz-Basis sind als Schutz für Beton vielversprechend. Eine Abdichtung gegen Wasser ist ohne weiteres gegeben, wenn Epoxyharz als Binder für eine rutschfeste Beschichtung aus Schmirgel dient. Die Konsistenz der Epoxybinde kann auf die Verarbeitung durch Spritzen oder Aufbürsten eingestellt werden; die Binder können gefärbt werden, haften ausgezeichnet auf Beton und sind äußerst widerstandsfähig gegen Altern und chemische Einwirkung.

Bituminöse Anstriche haben sich bewährt, wenn sie keinen strengen Witterungsbedingungen ausgesetzt sind; Gummi oder Asphalt-Gummigemische bieten bei verbesserter Wetterbeständigkeit entsprechende Vorteile.

7.7 Stopfverfüllung

Dieses Verfahren ist bei Bolzenlöchern, tiefen aber nicht zu weiten Partien, Kiesnestern und Löchern mit großem Verhältnis von Tiefe zu Weite anzuwenden [57]. Unter diesen Voraussetzungen erweist sich die Stopfverfüllung als einwandfrei, da praktisch kein Schwinden eintritt und die Festigkeit des Füllmörtels die des Betons erreicht oder überschreitet. Der Mörtel besteht gewöhnlich aus 1 Teil Zement und 2,5 Teilen Sand 0/1 mm (Gew.- oder Raumteile). Der Mörtel enthält nur soviel Wasser, daß er, in der Hand leicht gepreßt, diese befeuchtet, sich ballen, jedoch kein Wasser austreten läßt. Wenn die Füllung fest verdichtet ist, wird sie gummiartig-plastisch. Mit weniger Wasser entsteht keine fehlerfreie, dichte Füllung, etwas mehr führt zu übermäßigem Schwinden und lockerer Füllung. Der „Trockenmörtel“ soll in Schichten von ungefähr 1 cm Dicke eingebracht und mit einem Hartholzstock und Hammer verdichtet werden. Metallstampfer sind ungeeignet, da die Stampffläche damit glatt und ein unsicherer Verbund erhalten wird.

7.8 Ausflicken von Rissen

Dem Flicker einer Fuge oder eines Risses muß eine gründliche Reinigung vorausgehen; manchmal ist Preßluft ausreichend. Oft sind aber auch Spitzhacken oder ähnliche Geräte nötig, um losen Beton, Steine, Staub, Fugenfüllmasse und andere Fremdstoffe zu entfernen.

Je nach den Erfordernissen können Risse in 2 Gruppen eingeteilt werden:

1. Risse, die nur einen Verschuß gegen das Eindringen von Fremdstoffen erfordern,
2. Risse, deren Ausbesserung für den baulichen Zusammenhang erforderlich ist.

Die Entscheidung hierüber hängt von der Rißursache und der Art des Bauteils ab. Falls die Spannungen, die den Riß verursachten, durch ihn abgebaut worden sind, ist es möglich, den baulichen Zusammenhang mit einiger Aussicht auf Bestand wieder herzustellen. Bei Rissen, die – wie in Fahrbahndecken – durch große Plattenreibung oder vertikale Verlagerung des Untergrunds verursacht wurden, ist auf die Dauer selten eine andere Ausbesserung als nur ein Verschließen möglich. Hierzu werden Asphalt, abgewandelte Polysulfide¹⁸⁾ und Gummi-Asphalt-Füllmassen erhitzt oder kalt verwendet.

Eine Wiederherstellung des baulichen Zusammenhangs über einen zufälligen Riß hinweg kann mit Epoxyharz geschaffen werden, das eine wesentlich größere Zug-, Druck- und Scherfestigkeit als derzeit übliche Betone besitzt. Die Erfahrung konnte das in die Dauerhaftigkeit der Epoxyharze zunächst gesetzte Vertrauen noch nicht bestätigen, jedoch wird angenommen, daß dies in der Zukunft ausreichend erhärtet wird.

¹⁸⁾ Anmerkung: Vermutlich Polyalkylsulfide (Thioplaste).

7.9 Klebemittel

Mit ihnen wird frischer und erhärteter Beton verbunden. Typische Anwendungsfälle ergeben sich beim Beschichten von abgeschliffenen Betonfahrbahnen und beim Ausbessern von beschädigten Betonbauten. Ein Haftmittel kann als gesonderte Schicht zwischen altem und neuem Beton aufgebracht oder es kann der Betonmischung zugesetzt werden. Auch hier ist der alte Beton bis zum gesunden Beton zu entfernen und mindestens so weit, daß der neue Beton in angemessener Dicke aufgebracht werden kann (bei Fahrbahndecken selten unter 5 cm). Die Mindestdicke hängt in anderen Fällen z. B. auch davon ab, ob Bewehrungsstäbe vorhanden sind, die zum Zusammenhalt beitragen, und auch von den übrigen Abmessungen der Flickstelle.

Zementmörtel und reiner Zementleim sind allgemein als Verbindungsmittel benutzt worden, und viele Berichte weisen auf die Dauerhaftigkeit einer solchen Ausführung hin; um durchweg gute Ergebnisse zu erzielen, ist jedoch Sorgfalt nötig.

Polyvinylacetat, als Dispersion geliefert, verbessert die Haftung und den Widerstand gegen Rißbildung. Da eine Polyvinylacetat-Dispersion erweicht, wenn die Flickstelle feucht wird, sollten für Flickstellen in nicht dauernd trockener Umgebung nur Polyvinylacetate mit Bestandteilen verwendet werden, die den trockenen Film feuchtigkeitsbeständig machen. Butadien oder Styrol-Latex-Mischpolymerisate, die gegen eine Koagulation durch Zement stabilisiert sind, dienen manchmal als Haftmittel; auch sie müssen so zusammengesetzt sein, daß ein getrockneter Film feuchtigkeitsbeständig bleibt.

Epoxyharze als Haftmittel werden zur Zeit mit Aussicht auf dauernden Erfolg angewendet. Mit der Anwendung sind einige Nachteile verbunden, wie hohe Kosten, Giftigkeit und schwierige Anwendung wegen der kurzen Topfzeit. Im übrigen soll wie bei Verwendung anderer Haftmittel vorgegangen werden. Auch bei auslaufenden Betonflicken werden hier brauchbare Ergebnisse erzielt, obwohl es besser ist, trotz Zwischenschaltens dieses Haftmittels eine Betonmindestdicke von 2,5 cm einzuhalten.

7.10 Nachbehandlung von Ausbesserungen

Die Nachbehandlung ist nötig, um dem Beton der Ausbesserung genügend Feuchtigkeit für eine angemessene Hydratation des Zements zu erhalten. Die Nachbehandlung muß auch Temperaturwechsel in der ersten Zeit und frühes Schwinden verhindern, weil dadurch Raumänderungen auftreten, die der Haftung abträglich sind. Eine Feuchtbehandlung von etwa 5 Tagen ist im allgemeinen angemessen. Nasse Sackleinwand, Dränrohre oder gelochte Wasserrohre sind hierfür brauchbar, ferner hellfarbiges, wasserdichtes Papier oder weiße Polyäthylenfolien. Weiße Nachbehandlungsmittel können nach 3 Tagen anstelle der Feuchtbehandlung treten. Bei Ausbesserungen an neuem Beton soll auch der anstehende Beton zusammen mit der Flickstelle behandelt werden.

SCHRIFTTUM :

- [1] Powers, T. C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 41 (1944/45) S. 245/272.
- [2] Powers, T. C.: The air requirement of frost-resistant concrete. Proc. Highway Research Board 29 (1949) S. 184/202.
- [3] Powers, T. C.: Resistance of concrete to frost at early ages. Proc. RILEM Symposium on Winter Concreting, Session C (1956) S. 1/47.
- [4] Verbeck, G., und R. Landgren: Influence of physical characteristics of aggregates on frost resistance of concrete. Proc. ASTM 60 (1960) S. 1063/1079.
- [5] ACI Committee 617: ACI standard specifications for concrete pavements and concrete bases (ACI 617-58). Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 53/81.
- [6] Jackson, F. H.: Durability of concrete in service. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1946/47) S. 165/180.
- [7] Lewis, D. W.: Deterioration of structural concrete in Indiana. Extension Series Nr. 88; Engineering Reprint Nr. 108, Purdue University Engineering Experiment Station, 1956, S. 97/114.
- [8] Backstrom, J. E., R. W. Burrows, R. C. Mielenz und V. E. Wolkodoff: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete, Part 2 - Influence of type and amount of air-entraining agent. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 261/272.
- [9] Mielenz, R. C., V. E. Wolkodoff, J. E. Backstrom und R. W. Burrows: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete, Part 4 - The air void system in job concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 507/517.
- [10] Index of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1961.
- [11] ACI Committee 621: Selection and use of aggregates for concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) S. 513/541.
- [12] Powers, T. C.: Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. Proc. ASTM 55 (1955) S. 1132/1155.
- [13] Tremper, B., und D. L. Spellman: Tests for freeze-thaw durability of concrete aggregates. Highway Research Board, Bulletin 305, 1961, S. 28/50.
- [14] ACI Committee 614: ACI recommended practice for measuring, mixing, and placing concrete (ACI 614-59). Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 535/565.
- [15] ACI recommended practice for winter concreting (ACI 604-56). Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 1025/1047.
- [16] ACI recommended practice for hot weather concreting (ACI 605-59). Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 525/534.
- [17] ACI Committee 612: Curing concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 161/172.
- [18] Blackburn, J. B.: Tests on waterproof coatings for concrete surfaces - Final Report Bulletin 54, American Railway Engineering Association, Nr. 503, 1952, S. 191/242.
- [19] Mather, B.: Factors affecting durability of concrete in coastal structures. Technical Memorandum Nr. 96, Beach Erosion Board, 1957, S. 49 ff.
- [20] Hansen, W. C.: Effect of age of concrete on its resistance to scaling caused by using calcium chloride for ice removal. Proc. Amer. Concr. Inst. 50 (1953/54) S. 341/351.
- [21] Verbeck, G. J., und P. Klieger: Studies of salt scaling of concrete. Highway Research Board (Publ. 485), Bulletin 150, 1957, S. 1/13.
- [22] Klieger, P.: Curing requirements for scale resistance of concrete. Highway Research Board (Publ. 485), Bulletin 150, 1957, S. 18/31.
- [23] Bastiansen, R., J. Maum und I. Th. Rosenqvist: Bidrag til belysning af visse bygningslekniske problemer ved Osloomradets alunskifre. Norges Geotekniske Institut (Oslo), 1957.
- [24] Hagermann, T., und H. Roosaar: Damage to concrete caused by sulfide minerals. Betong (Stockholm) 40 (1955) Nr. 2, S. 151/161.

- [25] Corrosion of concrete sewers. South African Council for Scientific and Industrial Research. Wallach's P. and P. Co., Ltd., Pretoria 1959, S. 236 ff.
- [26] Scripture, E. W., S. W. Benedict und D. E. Bryant: Floor aggregates. Proc. Amer. Concr. Inst. 50 (1953/54) S. 305/316.
- [27] Price, W. H.: Erosion of concrete by cavitation and solids in flowing water. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1946/47) S. 1009/1023.
- [28] Schuman, L., und J. Tucker: A portable apparatus for determining the relative wear resistance of concrete floors. Journal of Research 23 (1939) No. 5, S. 549/570. National Bureau of Standards, Research Paper RP-1252.
- [29] Witte, L. P., und J. E. Backstrom: Some properties affecting the abrasion resistance of air-entrained concrete. Proc. ASTM 51 (1951) S. 1141/1155.
- [30] Smith, F. L.: Effect of aggregate quality on resistance of concrete to abrasion. ASTM Special Technical Publication No. 205, 1958, S. 91/106.
- [31] Covell, C. E.: Heavy duty concrete floors. Proc. Amer. Concr. Inst. 24 (1927/28) S. 454/463.
- [32] Kennedy, H. L., und M. E. Prior: Abrasion resistance. ASTM Special Technical Publication No. 169, 1956, S. 163/174.
- [33] Kauer, J. A., und R. L. Freeman: Effect of carbon dioxide on fresh concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 447/454.
- [34] Smith, F. L.: The effect of various surface treatments using magnesium and zinc fluosilicate crystals on abrasion resistance of concrete surfaces. Concrete Laboratory Report No. C-819, Bureau of Reclamation, Denver/Col. 1956.
- [35] Halstead, S., und L. A. Woodworth: The deterioration of reinforced concrete structures under coastal conditions. Transactions (South African Institution of Civil Engineers) 5 (1955) No. 4, S. 115/134.
- [36] Tremper, B., J. L. Beaton und R. F. Stratfull: Corrosion of reinforcing steel and repair of concrete in a marine environment, Part II. Highway Research Board, Bulletin 182, 1958, S. 18/41.
- [37] Tyler, I. L.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 12 - Concrete exposed to sea water and fresh water. Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 825/836.
- [38] Tremper, B.: The corrosion of reinforcing steel in cracked concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1946/47) S. 1137/1151.
- [39] Monfore, G. E., und G. J. Verbeck: Corrosion of prestressed wire in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 491/515.
- [40] Powers, T. C., L. E. Copeland und H. M. Mann: Capillary continuity or discontinuity in cement pastes. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 1 (1959) S. 38/48.
- [41] Higginson, E. C.: Effect of steam curing on the important properties of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) S. 281/298.
- [42] Gewertz, M. W.: Corrosion of reinforcing steel and repair of concrete in a marine environment, Part I. Highway Research Board, Bulletin 182, 1958, S. 1/17.
- [43] Stratfull, R. F.: Progress report on inhibiting the corrosion of steel in a reinforced concrete bridge. Corrosion (National Association of Corrosion Engineers) 15 (1959) No. 6, S. 65/68.
- [44] Chemical reactions of aggregates in concrete. Highway Research Board, Special Report No. 31, 1958, S. 12 ff.
- [45] ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1961.
- [46] Malher, B.: Petrographic identification of reactive constituents in concrete aggregate. Proc. ASTM 48 (1948) S. 1120/1125.
- [47] Mielenz, R. C.: Petrographic examination of concrete aggregate to determine potential alkali reactivity. Highway Research Board, Research Report 18-C, 1958, S. 29/38.
- [48] Use of reactive aggregates in portland cement concrete. Engineering Manual EM 1110-1-2002, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg/Miss. 1957.
- [49] Chaiken, B., und W. J. Halstead: Correlation between chemical and mortar bar tests for potential alkali reactivity of concrete aggregates. Highway Research Board, Bulletin 239, 1960, S. 24/40.

- [50] Hansen, W. C.: Expansion and cracking - Studied in relation to aggregate and the magnesia and alkali content of cement. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 867/878.
- [51] Scholer, C. H., und G. M. Smith: A rapid accelerated test for cement-aggregate reaction. Proc. ASTM 54 (1954) S. 1165/1177.
- [52] Swenson, E. G., und J. E. Gillot: Characteristics of Kingston carbonate rock reaction. Highway Research Board, Bulletin 275, 1960, S. 18/31.
- [53] Hadley, D. W.: Alkali reactivity of carbonate rocks - Expansion and dedolomitization. Highway Research Board 40 (1961) S. 462/474.
- [54] Davis, R. E.: Prepack method of concrete repair. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 155/172).
- [55] Tremper, B.: Repair of damaged concrete with epoxy resins. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 173/182.
- [56] Tuthill, L. H.: Conventional methods of repairing concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 129/138.
- [57] Concrete Manual. U.S. Bureau of Reclamation, 6th Edition. Denver/Col. 1955, S. 340/342, Fig. 147 und 148.
- [58] Felt, Earl J.: Resurfacing and patching concrete pavement with bonded concrete. Proc. Highway Research Board 35 (1956) S. 444/469.
- [59] Felt, Earl J.: Repair of concrete pavement. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 139/153.
- [60] Recommended practice for the application of mortar by pneumatic pressure (ACI 805-51). Proc. Amer. Concr. Inst. 47 (1950/51) S. 709/719.
- [61] Kulberg, O. N.: Pneumatically applied mortar for restoring concrete structures. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 183/192.
- [62] Miesenhelder, P. D.: Effect of design and details on concrete deterioration. Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 581/590.