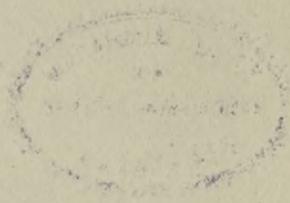


WYDZIAŁ POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II 3129

L. inw.



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000297578

DER EISENBETON

UND
PHYSIKALISCH-CHEMISCHE
UNTERSUCHUNGEN

DE PAUL HORNAND



xxx
564

DER EISENBETON

KOLLOIDCHEMISCHE
UND PHYSIKALISCH-CHEMISCHE
UNTERSUCHUNGEN

VON

DR. PAUL ROHLAND

A. o. PROFESSOR AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE STUTTGART

MIT 2 TAFELN

F. Nr. 26 534



LEIPZIG

VERLAG VON OTTO SPAMER

1912

xxv
564

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

II 3129

Druck der Spamiérschen Buchdruckerei in Leipzig.

Akc. Nr. 2844/49

Vorwort.

Trotz des raschen Siegeslaufes, den der Eisenbeton in kurzer Zeit durchheilt hat, trotz seiner enormen Verbreitung und seiner Verwendung zu unzähligen Gegenständen ist seine chemische und physikalische Beschaffenheit in mancher Hinsicht ein unbekanntes und unbebautes Feld geblieben.

Es mag das zum Teil wohl daran liegen, daß erst jetzt über die chemische Konstitution eines seiner Bestandteile, des Zements, sichere Klarheit verbreitet ist.

Aber besonders zwei schon an und für sich rein wissenschaftlich und theoretisch interessante Vorgänge, aber von der allergrößten Bedeutung für den Eisenbeton selbst, und deren Ursachen: die Nichtoxydation des Eisens im Beton, seine Rostsicherheit, und die Entrostung des Eisens im Beton, sind erst durch meine Untersuchungen im Jahre 1908 und 1909 erkannt und bekannt geworden.

Selbst in dem so vorzüglichen Handbuch von K. K. Oberbaurat Dr.-Ing. von Emperger finden sich über den ersten Vorgang unrichtige Ansichten wiedergegeben, über den zweiten findet sich überhaupt nichts.

Daher erschien es ein Bedürfnis, diese Untersuchungen, die noch auf manche andere Eigenschaft des Eisenbetons, die Haftfestigkeit des Eisens am Beton, die Ausdehnungsfähigkeit des Eisenbetons usw. erhellendes Licht werfen, kurz zusammenzufassen und einem größeren Leserkreise, nicht nur dem Physiker und Chemiker, sondern besonders auch dem Ingenieur und Architekten in jüngeren und höheren Semestern, aber auch dem Techniker und Industriellen, besonders des Eisenbetonbaus, zugänglich zu machen.

Denn nur die genaue Kenntnis der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Baumaterials gewährleistet Bauten, die Jahrzehnte überdauern, und zugleich solche in ästhetisch anmutender Form.

Stuttgart, Institut f. Elektrochemie u. technische Chemie d. Technischen Hochschule, den 15. Aug. 1911.

Paul Rohland.

Inhalt.

Kapitel I. Die Historie des Eisenbetons	1
Zement und Beton, die Ägypter S. 1. Die Griechen S. 1. Die Römer S. 1. Puzzolane S. 1. Trasse S. 2. Naturbeton S. 2. Im Mittelalter S. 3. Im Jahre 1800 S. 3. In Frankreich und England S. 3. Romanzement S. 4. Portlandzement S. 4. In Deutschland S. 4. Das Eisen S. 5. Eisenbeton S. 5. Monier S. 6. Die theoretischen Grundlagen des Eisenbetonbaus S. 7. Anwendungen des Eisenbetonbaus S. 7.	
Kapitel II. Das Eisen	8
Oxydation des Eisens S. 8. Nichtoxydation des Eisens S. 9. Einfluß der Säuren bzw. Wasserstoffionen, Oxydationsbeschleunigung S. 9. Einfluß von Salzen S. 9. Einfluß des Wassers S. 9. Erklärung auf Grundlage der Ionentheorie S. 9. Elektrolytische Oxydationstheorie S. 10. Technisches Eisen S. 11. Ferroxylreaktion S. 11. Einfluß der Hydroxyde, Oxydationsverzögerung S. 11. Einfluß der Chromate, Dichromate und des Chromichlorids S. 12. Passivität des Eisens S. 14. Keine Oxydschicht S. 14. Zug- und Biegespannung des Eisens S. 14. Haftintensität des Eisens S. 15. Form des Eisens S. 15. Ausdehnungskoeffizienten des Eisens und des Betons S. 15.	
Kapitel III. Der Zement	16
Portlandzement und Eisenportlandzement S. 17. Konstitution des Zements S. 17. Dünnschliffe S. 19. Alit S. 19. Quellung S. 22. Freies Calciumoxyd S. 23. Einfluß von Zusätzen auf die Abbindezeit S. 24. Die Ursachen der Einwirkung der Zusätze S. 28. Zusatz von Gips S. 28. Umschlagen der Abbindezeit S. 29.	
Kapitel IV. Der Eisenbeton	30
Rostsicherheit des Eisenbetons S. 30. Ursachen der Rostsicherheit S. 31. Oxydation der anderen, unedlen Metalle im Beton S. 32. Blei, Zink, Zinn, Kupfer, Aluminium und Beton S. 32. Die Entrostung des Eisens im Eisenbeton S. 34. Ursachen der Entrostung S. 35. Adhäsionsenergie (Haftfestigkeit) des Eisens am Beton S. 38. Ursachen der Haftfestigkeit S. 39. Sande, Kiese, Schlacken S. 39. Müllverbrennungsschlacken S. 40. Betonierungsregeln S. 43. Druckfestigkeit des Eisenbetons S. 44.	

Kapitel V. Das Verhalten des Eisenbetons gegen Flüssigkeiten aller Art, Meerwasser, Gase usw. . . 44

Säuren und saure Salze S. 45. Laugen S. 47. Thermalwasser S. 47. Meerwasser S. 48. Mechanische Wirkung der Wellen S. 49. Eisenbetonpfähle S. 50. Öle, Fette, Teere S. 51. Fabrik- und städtische Abwässer S. 52. Gärungsflüssigkeiten S. 54. Heiße Flüssigkeiten S. 56. Wasserdichtigkeit S. 56. Humusstoffe S. 57. Gase S. 58. Der elektrische Strom S. 59. Blitz S. 59. Höhere Temperatur und Feuer S. 60. Widerstandsfähigkeit gegen Verwitterungen S. 61. Erdbeben S. 62.

Kapitel VI. Die Eisenbetonschutzmittel 63

Anforderungen S. 63. Schutzmittel gegen Meerwasser S. 63. Nigrit S. 64. Gärgefäße, Tanks usw. S. 65. Zementkunststeine S. 66. Auswitterungen S. 66.

„Es gibt keinen Zufall,
Und was uns blindes Ohngefähr nur dünkt,
Gerade das steigt aus den tiefsten Quellen.“

Schiller (1799).

I.

Die Historie des Eisenbetons.

Die Geschichte der Entdeckungen der einzelnen Naturgesetze ist noch ungeschrieben; sie würde zweifellos sehr interessante und bedeutungsvolle Ergebnisse haben; gerade die Historie des Eisenbetons weist ein merkwürdiges Phänomen auf.

Schon in frühen Kulturstadien der Menschheit sind hydraulische Bindemittel angewendet worden; die alten Ägypter benutzten solche für ihre Wasserbauten. Bei einem solchen Bauwerk ist eine bautechnische Tatsache bemerkenswert: die Mauern, welche die Tempel des Osiris und Isis auf der Insel Philä vor den Fluten des Nils schützen sollten, sind gegen das Wasser konkav, nach dem Inneren der Insel konvex gebaut, und besitzen so eine größere Widerstandskraft nach beiden Seiten.

Zement
und Beton;
die Ägypter.

Während die Griechen zwar den Luftmörtel, den Kalk und Gipsmörtel angewendet haben, scheint ihnen der Gebrauch eines Wassermörtels unbekannt geblieben zu sein.

Die
Griechen.

Dagegen haben die großen Baumeister der alten Zeit, die Römer, schon vorzügliche hydraulische Bindemittel herzustellen gewußt; sie fanden, wie Vitruv berichtet, bei Puteoli am Meerbusen von Bajä und Neapel ein eigenartiges ton- und kieselhaltiges Material.

Die Römer.

Dieses Material gehört seiner Natur und Entstehung nach der Trachytformation an und ist wahrscheinlich durch sub-maritime Eruptionen entstanden; es ist ein vulkanisches Tuffgestein.

Dieses Tuffgestein, die Puzzolana, hat unter Hinzufügung von gelöschtem Kalk die Eigenschaft eines wasserwiderstandsfähigen Mörtels, und die Römer verwandten es zur Herstellung von Kanalisationsröhren, wie die cloaca maxima, von Wasserleitungen und Hafengebäuden, die sich vorzüglich gehalten haben; dabei

Puzzolane.

kannten sie den Beton sowohl in Form von Schüttungen als auch in der gehärteter Betonblöcke.

Besonders ein Molenbau bei Neapel, der unter der Regierung des degenerierten Caligula errichtet worden ist, soll ein hervorragendes Werk gewesen sein.

Trasse.

Nach ihrer Invasion in Germanien entdeckten die Römer ein ähnliches Material in der Eifel, im Mosel-, Nette- und Brohltal, im Ries bei Nördlingen, das offenbar ihren heimischen Puzzolanen sehr nahestand, die Trasse, und benutzten sie zu den gleichen Zwecken. Besonders gut haben sich bis heute Teile einer Wasserleitung von der Eifel bis zur Agrippina coloniensis erhalten.

Einen Schritt weiter — und schon die Römer wären sicher zur Kombination Eisenbeton gelangt; um so mehr, als sie verschiedene große Eisenbergwerke gerade um diese Zeit in den neu eroberten Ländern im Besitz hatten. Aber das moralisch gesunkene kaiserliche Rom versank, eine im Zeitraum von Jahrtausenden geschaffene Kultur wurde vernichtet, und Jahrhundert um Jahrhundert mußte vergehen, ehe die technische Kulturentwicklung wieder an den früheren Punkt anknüpfen konnte.

Erst in der Mitte des vorigen Jahrhunderts stieg der Gedanke, Beton mit Eisen zu verbinden, aus der Vergessenheit herauf, und einem Gärtner war es schließlich vergönnt, diesen Gedanken zu brauchbaren Patenten zu verdichten.

Aber noch ein anderes merkwürdiges Phänomen, das in das Dunkel der Urzeit hineinreicht, weist die Geschichte des Eisenbetons auf; es ist begründet in einer eigentümlichen Eigenschaft des Eisens.

Nur dadurch nämlich, daß sich das Eisen bei seiner Bildung aus dem einst einzig vorhandenem Urmetall die Eigenschaft erworben hat, von allen unedlen Metallen, Aluminium, Zink, Zinn, Kupfer, Blei usw., unter alkalischen Flüssigkeiten unoxydiert zu bleiben, ist die Kombination Eisenbeton möglich. Die Ursache hiervon soll später angegeben werden.

Naturbeton.

Aus dem sechsten Jahrhundert wird berichtet, daß von den Mauren bei Amalfi in Süditalien eine Brücke aus Naturbeton errichtet worden ist.

Der Naturbeton findet sich noch jetzt u. a. in Deutschland, auf dem Rigi, im Thüringer Wald, auch in der Umgebung von Stuttgart.

Der Naturbeton ist in seiner ersten Entstehungsphase durch pyrochemische Reaktionen entstanden, auf ähnlichem Wege,

wie jetzt künstlich Zement hergestellt wird; da der Naturbeton die gleichen Eigenschaften wie dieser bzw. Beton besitzt, so wird er auch in demselben Temperaturgebiete, zwischen 1400 bis 2000°, gebildet worden sein.

Auch die Rohmaterialien waren die gleichen: Kalkstein in seinen verschiedenen Formen, Mergel und Tone; bei der genannten Temperatur wurden diese Stoffe in zufällig gebildeter, geeigneter Mischung bis zur Sinterung erhitzt.

Nun aber muß folgendes eingetreten sein: infolge Temperaturerniedrigung und durch Berührung mit der Feuchtigkeit der Luft und dem Wasser erfolgte ein Zerfall der zusammengesinterten Masse; infolge der Bildung von Kolloidstoffen, den Hydroxyden des Siliciums, Aluminiums und Eisens, die aus ihr durch das Wasser abgespalten werden, entstand eine breiige, plastische Masse.

Diese floß zu Tal, riß auf diesem Wege Geröll und Schotter mit sich fort und koagulierte an geeigneter Stelle.

Daher ist die Adhäsion zwischen dieser koagulierten Masse und dem Geröll usw. sehr groß; denn die koagulierten Stoffe, die als ein engzelliges Maschengewebe aufzufassen sind, umschließen es mit großer Intensität.

Zu Beginn des Mittelalters sind wenig Betonbauten in Frankreich und England errichtet worden; bemerkenswert sind die Fundamentanlagen der Salisbury-Kathedrale aus dem dreizehnten Jahrhundert.

Im Mittelalter.

Im späteren Mittelalter, in der Zeit der „Naturverachtung“, in einer Zeit, in der die Natur als „Domäne des Teufels“ bezeichnet wurde, in der, statt nach erreichbaren Zielen zu streben, phantastischen Idealen nachgejagt wurde, ging, wie so manche andere technische Erfindung, die Kunst, hydraulische Mörtel herzustellen und zu verwenden, vollständig verloren.

Und später, in der Neuzeit, noch um das Jahr 1800, dominierten wenigstens in Deutschland die sog. Geisteswissenschaften, während den exakten und technischen Wissenschaften relativ wenig Beachtung geschenkt wurde.

Im Jahre 1800.

Aber in Frankreich und England entfaltete sich damals eine neue Blüte der Technik; die Anwendung von Beton wurde in größerem Maße von dem Ingenieur Poirel bei den Hafenbauten in Algier 1834 aufgenommen; ferner wurden in ersterem Lande von Vicat, in England von dem Ingenieur John Smeaton neue Versuche unternommen, um einen brauchbaren hydraulischen Mörtel herzustellen.

In Frankreich u. England.

Diese Aufgabe fiel in England mit einer sehr praktischen Frage

zusammen. Zwei Leuchttürme waren durch die anstürmenden Meereswogen zerstört worden; ein neuer Leuchtturm, der Eddystone-Leuchtturm, am Eingange in die Bucht von Plymouth, sollte errichtet werden. Smeaton verwandte einen bläulich-grauen Kalkstein aus der Gegend von Abertthaw in South-Wales, der nach Unterwerfung eines Brennprozesses stark erhärtete und den Einwirkungen des Wassers widerstand.

Roman-
zement.

Ein weiterer Fortschritt war, daß James Parker durch Brennen von Kalkmergelnieren, die sich in einer an den Ufern der Themse liegenden Tonschicht vorfanden, ein hydraulisches Bindemittel herzustellen lehrte, das den Namen „Romanzement“ erhielt, weil es ebenso vortreffliche hydraulische Funktionen besitzen sollte, wie der Puzzolan- und Traßmörtel der alten Römer.

Solche Kalkmergelnieren finden sich in Frankreich bei Boulogne sur mer, in Deutschland in Franken und auf Rügen.

Aus solchem Romanzement wurde in Frankreich im Jahr 1816 die erste größere Betonbrücke über die Dordogne bei Souillac erbaut.

Portland-
zement.

Aber erst nach mühevollen langjährigen, empirischen Versuchen gelang es einem Maurermeister in Seeds in England, Joseph Aspdin, durch eine richtige Mischung von Kalkstein und Ton und Anwendung der dazu nötigen Brenntemperatur zum ersten Male einen künstlichen hydraulischen Mörtel herzustellen, der den Namen „Portlandzement“ erhielt, unter Bezugnahme auf den damals vielfach verwendeten Haustein, den Portlandstein.

In dem englischen Patent, das J. Aspdin für seine Entdeckung am 21. Oktober 1824 erhielt, sind die wesentlichsten Punkte, auf welche die moderne Portlandzementfabrikation sich stützt, schon erhalten.

Noch hatte diese Fabrikation einen Fehler, im Jahr 1845 erst erkannte Johnson, daß nicht Schwachbrand, sondern eine hohe Brenntemperatur den Rohmaterialien des Zements die besten hydraulischen Eigenschaften verleiht, und schuf die ersten wissenschaftlichen Grundlagen für seine Herstellung.

In Deutsch-
land.

In Deutschland wurde erst im Jahre 1855, erst in Züllichow, dann in Stettin, das erste Portlandzementwerk errichtet, dessen Rohmaterialien Kalkstein und Mergel bzw. Tone sind.

In neuerer Zeit wird sog. Eisenportlandzement in den Handel gebracht; hergestellt wird er größtenteils im westfälischen

und rheinischen Industriegebiet, in dem die zahlreichen Hochöfen Schlackenprodukt als Nebenprodukt liefern.

Aus sehr fein gemahlener Hochofenschlacke und Kalksteinmehl wird durch Brennen bei 1400 bis 1600° Zement hergestellt; diesem wird noch reine Hochofenschlacke, die mit kaltem Wasser abgeschreckt und dadurch körnig gemacht worden ist, zugesetzt. Der Eisenportlandzement besteht demnach aus 70 v. H. Zement und 30 v. H. granulierter Hochofenschlacke.

Die Entdeckung des anderen Bestandteils des Eisenbetons, des Eisens, ist noch viel älteren Datums als die des Betons; sie reicht zurück bis nahe an die Tage der Menschwerdung im Sinne Darwins. Das Eisen.

Von den geschichtlich bekannten Völkern hatten die Indier eine gut ausgebildete Eisenindustrie; nach Berichten von Reisenden steht heute noch eine Säule aus Eisen von 6000 kg Gewicht in der Nähe von Delhi, die aus ziemlich reinem Eisen besteht und aus diesem Grunde selbst in der Atmosphäre Indiens sich nicht oxydieren soll!

Die Ägypter, Etrusker, Germanen kannten und verarbeiteten das Eisen; bei den Griechen und Römern entwickelte sich eine ausgedehnte bergmännische Industrie, die auch schon mit Sprengstoffen arbeitete.

Aber auch hier vernichtete die mittelalterliche Reaktion die schon blühenden Industrien zum großen Teile, bis die vielgeschmähte Alchimie sich dieser Aufgaben bemächtigte, die Grundlagen für die wissenschaftliche Erforschung der Eisengewinnung legte, auf die dann im achtzehnten Jahrhundert die „Verbrennungstheorie“ des genialen Chemikers Lavoisier einen aufklärenden und leuchtenden Schein warf, indem nunmehr die Verhüttung der Eisenerze als eine Sauerstoffentziehung, als eine Reduktion richtig erkannt wurde.

Die ersten Spuren der Idee, Eisen mit Beton zu verbinden, lassen sich bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts verfolgen. Th. Hyatt berichtete allerdings erst im Jahre 1877 über Versuche, die mit Eisenbetonbalken schon im Jahre 1855 unternommen worden waren. Aus demselben Jahr ist auch das Patent des Franzosen Lambot zu erwähnen, der Eisenbeton zur Herstellung von Schiffskörpern benutzen wollte¹⁾. Tatsächlich hat man eine Zeitlang beabsichtigt, diese Idee weiter zu verfolgen, bis schließlich die Marineverwaltung in Toulon sie endgültig ablehnte²⁾. Eisenbeton.

¹⁾ Beton und Eisen. 1903. S. 12, 82, 141.

²⁾ Beton und Eisen. 1902. S. 82.

Auch vom jetzigen Standpunkt unserer Kenntnisse über die Eigenschaften des Zements und Betons müssen allerdings diesem Plane schwere Bedenken entgegengebracht werden, weil die im Meerwasser hauptsächlich enthaltenen Magnesiumsalze mit dem Kalk des Zements, der während des Abbindens und in der ersten Periode der Erhärtung abgespalten wird, sich verbinden und so den Zement bzw. Beton zerstören.

Ein anderer Vorläufer Moniers war der Ingenieur François Coignet (1861), der in seinen Memoiren Eisenbetonkonstruktionen beschrieb.

Monier.

Als der eigentliche Entdecker des Eisenbetons gilt der französische Handlungsgärtner Joseph Monier (1828—1906), der, wie es so vielen anderen genialen Entdeckern ging, aus seiner Gedankensaat keine rechten Früchte aufkeimen sah.

Das erste Patent erhielt Joseph Monier im Jahre 1876; dieses Patent auf die Fabrikation armerter Betonkübel hat folgenden Wortlaut:

Brevet d' Invention
de quinze années

en date du 16 juillet 1867, No. 77165 pour:

Système des caisses-bassins mobiles en fer et ciment, applicables à l'horticulture, par Joseph Monier.

Les caisses et bassins mobiles portatifs sont de toute grandeur, en tout genre, carrés, ronds, ovales, etc.

Elles sont à panneaux ouvrants ou non ouvrants, le système de fabrication est le même.

Pour les établir, je fais leur forme en barre de fer rond ou carré et fil de fer formant grillage, représenté par les figures et enduits avec du ciment de toute espèce, Portland, Vassy etc., d'une épaisseur d'un à quatre centimètres selon la grandeur.“

Später nahm Monier Zusatzpatente auf die Herstellung von Röhren, Behältern, ebenen Platten, Brücken, Treppen; und im Jahre 1875 wurde die erste Brücke aus Eisenbeton aufgeführt, von 16 m Länge und 4 m Breite.

Weitere Zusatzpatente im Jahre 1878 umfaßten dann das Patent, das als „Monier-Patent“ nunmehr dem Ausland bekannt wurde.

Die Entwicklung des Eisenbetonbaus in Deutschland knüpft sich vor allem an die Firmen Freytag & Heidschuk in Neustadt a. d. H. und Martenstein & Josseaux in Offenbach am Main, Dyckerhoff & Widmann in Biebrich a. Rh., und

an die Tätigkeit des Ingenieurs G. A. Wayß, M. Könen und anderer, die des Eisenbetonbrückenbaus an die Namen Melan, Möller, Visintini, in Amerika an die von Thaddäus Hyatt und Ransome.

Die theoretischen Grundlagen für den Eisenbetonbau schufen M. Könen, der zuerst die Navierschen Biegesetze für elastische Körper auf armierte Betonkörper anwandte, ferner von Thullie und von Emperger, und andere zahlreiche Arbeiten des Leiters der Stuttgarter Materialprüfungsanstalt, von Bach, ermittelten die Beträge der Druck- und Zugfestigkeit des Eisenbetons; sie ermittelten, daß eine Proportionalität zwischen Spannung und Formänderung nicht besteht, und führten zu dem von Bach-Schüleschen Potenzgesetz; andere Forscher untersuchten die Biege-, Scher- und Haftfestigkeit des Eisenbetons, dessen Ursachen aber erst durch meine nachfolgenden Untersuchungen über die kolloidchemische Natur des Zements bzw. Betons erkannt werden, über das Material der Eiseneinlagen, die teilweise als glatte, teilweise als mit Unebenheiten, Ausbauchungen und Einschnürungen versehene zur Anwendung kommen.

Die theoretischen Grundlagen des Eisenbetonbaues.

Untersuchungen über die Anfangsspannungen, die beim Abbinden und Erhärten infolge der Einwirkung der Luft oder des Wassers im Eisenbeton auftreten, über die durch Temperaturänderung veranlaßten Spannungen, über die Ausdehnungskoeffizienten von Bonniceau, Hyatt und anderen, über die Rost- und Feuersicherheit, vollendeten das stolze Wissenschaftsgebäude, das auf der gemeinsamen Arbeit von Theorie und Praxis beruht.

Und doch weist es noch in wissenschaftlicher Hinsicht einige Lücken auf, die durch die nachfolgenden Untersuchungen ausgefüllt werden sollen.

Trotzdem der Eisenbeton noch keine lange Verwendungszeit hinter sich hat, so sind von ihm doch im raschen Siegeslauf die verschiedenartigsten Gebiete erobert worden.

Anwendungen des Eisenbetonbaues.

Im Hochbauwesen sind Nutzbauten, wie Fabrikgebäude, Schornsteine, Speicher, Warenhäuser, Siloanlagen, Wassertürme, ferner Monumentalbauten, Bankhäuser, Theater, Ausstellungsgebäude, Luftschiffhallen, aus Eisenbeton errichtet worden; im Bauingenieurwesen Kai- und Ufermauern, Molen, Leuchttürme, Talsperren und vor allem Brücken, Aquädukte.

Aber auch zahllose kleinere Gebrauchsgegenstände stellt jetzt die Kunststeinindustrie aus Eisenbeton her: Treppen, Bord-

schwollen, Viehtröge, Trottoirplatten, Dachsteine, Mosaikplatten, Fassadensteine, nachgeahmt dem Sandstein, Buntsandstein oder Muschelkalk, Säulen, Badewannen, Grabsteine, Brunnenringe, Betonpfähle, Weinbergspfähle, Schwellen, Tanks, Müllkästen, Wagenräder usw., in Amerika sogar Schwungräder.

Wie die Historie des Eisenbetons beweist, hat kein anderes Baumaterial in der kurzen Zeit von 50 bis 60 Jahren seit den allerersten Anfängen einen so glänzenden Triumphzug durch die Lande aufgeführt.

II.

Das Eisen.

Wie wir gesehen haben, war es schließlich der französische Gärtner Monier, der eiserne Drähte mit Zementmörtel zur Herstellung von Pflanzenkübeln in Berührung brachte und später durch seine Patente die Grundlagen zur Entwicklung des Eisenbetonbaus schuf.

Diese Entdeckung mußte einem Laien zufallen; denn ein Physiker oder Chemiker wäre kaum auf den Gedanken gekommen, Eisen mit Zement zu verbinden, da er sich sofort sagen mußte, daß eine Oxydation und damit die Zerstörung des Eisens die Folge sein würde. Dieses ist nun trotzdem nicht der Fall.

Ich habe im Jahre 1908 die Ursachen dieses eigentümlichen Verhaltens zum ersten Male angegeben¹⁾.

Oxydation
des Eisens.

Den Ausgangspunkt einer zureichenden Erklärung bilden zunächst einige physikalisch-chemische Beobachtungen und Schlußfolgerungen bei der Oxydation des Eisens; es ist notwendig, die Frage an der Hand von Versuchen so präzise wie möglich zu beantworten, unter welchen Bedingungen Eisen sich oxydiert und unter welchen nicht.

Und wir werden sehen, daß trotz zahlloser Versuche, trotz sehr exakter Methoden, die Ursachen der Oxydation und Nichtoxydation des Eisens unter bestimmten Bedingungen immer noch nicht vollständig angegeben werden können.

Freilich erscheint die Beantwortung dieser Frage sehr leicht und wird dahin lauten, daß Eisen sich eben an der Luft oxydiert,

¹⁾ P. Rohland. Stahl und Eisen Nr. 5 1908. Eine Bemerkung über den Eisenbeton.

im luftleeren Raum aber nicht; indessen ist diese Beantwortung ungenau.

Denn sowenig sich Eisen in völlig trockner Luft oxydiert, ebensowenig rostet es unter Wasser, das keine Luft bzw. Sauerstoff absorbiert enthält. Das haben Versuche unzweideutig ergeben.

Nichtoxyda-
tion
des Eisens.

Es müssen demnach Luft bzw. Sauerstoff und mindestens Spuren von Wasser und Wasserdampf zugleich vorhanden sein; dann erst kann Oxydation eintreten; diese Bedingungen sind fast überall in der Atmosphäre und auch im Erdboden vorhanden.

Der Oxydationsprozeß des Eisens wird durch alle Säuren, also durch Wasserstoffionen, selbst durch die schwach dissoziierte Kohlensäure, beschleunigt; da nun auch das Wasser solche Ionen, wenn auch in sehr geringem Maße, enthält, so ist zu schließen, daß die Oxydation im reinen Wasser auch durch diese bedingt und gefördert wird.

Einfluß der
Säuren.
Oxydations-
beschleu-
nigung.

Außer allen Säuren beschleunigen auch die Salze die Oxydation, die infolge von Hydrolyse Wasserstoffionen enthalten und daher ebenfalls sauer reagieren, z. B. Salmiak, Glaubersalz; auch im Schwefelwasserstoffwasser oxydiert sich Eisen.

Einfluß von
Säuren.

Ferner ist die Oxydationsgeschwindigkeit des Eisens sehr groß im Wasser oder anderen Flüssigkeiten, die Chloride, Chlornatrium, Chlorkalium, Chlorcalcium usw., oder auch Sulfate, Natriumsulfat, Ammoniumsulfat enthalten; die Chlorionen wie die Sulfationen wirken im beschleunigenden Sinne.

Einfluß von
Salzen.

Demnach muß Eisen in Quell- und Thermalwasser, das Säuren oder diese Salze in größerer Menge gelöst enthält, sich sehr schnell oxydieren.

Von geschichtlicher Bedeutung ist die Tatsache, daß bereits im Jahre 1794 in einer Schrift von Fulhamme¹⁾ auf die Wichtigkeit des Vorhandenseins des Wassers für das Zustandekommen der Oxydationsreaktion des Eisens hingewiesen ist.

Seine Oxydationsgeschwindigkeit, die an vollständig trockner Luft gleich Null ist, wird durch die Anwesenheit selbst von Spuren von Wasser oder Wasserdampf stark beschleunigt.

Einfluß des
Wassers.

Voraussetzung ist dabei, daß niedere Temperatur herrscht, da das Eisen sich bei hoher Temperatur, auch ohne das Vorhandensein von Wasser und Wasserdampf, schnell mit dem Sauerstoff verbindet.

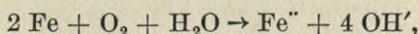
Ist es im flüssigen Aggregatzustande vorhanden, so beteiligt sich nach W. Ostwald²⁾ der Sauerstoff der Luft, indem er mit

Erklärung
auf Grund-
lage der Io-
nentheorie.

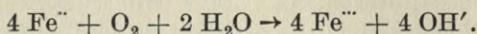
¹⁾ An Essay on Combustion. London.

²⁾ Grundlinien der anorganischen Chemie.

dem Wasser Hydroxylionen bildet und auf diese Weise das negative Ion liefert, das gleichzeitig entstehen muß, wenn das Eisen selbst in seine Oxydulverbindung übergeht, nach dem Ionenschema:



oder wenn die positive Ladung des so gebildeten Ferroions, das noch zu einer höheren Oxydationsstufe befähigt ist, um eine weitere vermehrt wird, nach dem Schema:



Mit \cdot sind die positiven, mit $'$ die negativen Ladungen der einzelnen Ionen bezeichnet.

In quantitativer Hinsicht und im Sinne einer weiter ausgebauten elektrolytischen Oxydationstheorie sendet das Eisen in Berührung mit Wasser positiv geladene Ferroionen in die Lösung, während es sich selbst negativ lädt, bis ein elektrochemisches Gleichgewicht zwischen dem Eisen und den Ferroionen eintritt.

Elektrolytische Oxydationstheorie.

Nun enthält aber selbst reines Wasser Wasserstoffionen, und ihr Übergang in elektrisch neutralen Wasserstoff durch die Ferroionen muß erfolgen, sobald nach W. Nernst¹⁾ der osmotische Druck der Wasserstoffionen und der elektrostatische Zug die elektrolytische Lösungstension des Wasserstoffs zu überwinden vermag, nach der Gleichung:

$$\sqrt[n_1]{\frac{C_1}{c_1}} > \frac{C_2}{c_2} ,$$

wobei

- C_1 die Lösungstension des Eisens,
- c_1 die Konzentration der Eisenionen,
- C_2 die Lösungstension des Wasserstoffs,
- c_2 die Konzentration der Wasserstoffionen,
- n_1 den chemischen Wert des Eisens bedeutet.

Es ist dann leicht ersichtlich, daß die Vermehrung der Wasserstoffionen, durch Zusatz von Säuren, die Oxydation beschleunigen muß. Der Sauerstoff aber bewirkt folgendes: durch Oxydation des abgeschiedenen Wasserstoffs wird eine schnelle Entfernung desselben und damit eine Lösungs- und Oxydationsbeschleunigung hervorgerufen.

¹⁾ Theoretische Chemie.

Für das technische Eisen treten aber noch weitere Komplikationen hinzu; die Beimengungen, die es enthält, Kohlenstoff, Mangan, Schwefel, Phosphor, Silicium bewirken folgendes. Die Lösungstension des Eisens wird dadurch beeinflusst; ist dann das Eisen von einem Elektrolyten umgeben, so bilden sich Potentialunterschiede an der Oberfläche; die positiven Wasserstoffionen wandern nach den Stellen mit größerem Lösungsdruck, um mit den Eisenionen in Reaktion zu treten; infolgedessen tritt an den Stellen mit niedrigerem Lösungsdruck eine Anhäufung von Hydroxylionen ein.

Technisches
Eisen.

Diesen Vorgang haben Cushman und Walker¹⁾ zur Anwendung der Ferroxylreaktion benutzt; auf Zusatz von Ferricyankalium muß da, wo das Ferroion in größerer Konzentration in Lösung geht, die blaue Farbe (Berliner oder Turnbells Blau) eintreten, und da, wo Hydroxylionen in größerer Konzentration vorhanden sind, auf Zusatz von Phenolphthalëin Rotfärbung. Das zu untersuchende Eisenstück wird dabei in eine Lösung von Gelatine oder Agar-Agar gelegt.

Ferroxyl-
reaktion

Ferner zeigt sich die Rostbildung zuerst an korrodierten Stellen des Eisens, was leicht mit dem Ferroxylreagens nachgewiesen werden kann; an einer vollständig glatten und rissfreien Oberfläche macht sich der Einfluß der oxydierenden Agentien viel schwerer geltend.

Schließlich „frißt der Rost weiter“; das bedeutet, daß das schon gebildete Eisenoxyd den Oxydationsprozeß unterstützt, indem dieses Wasserdampf und Luft bzw. Sauerstoff absorbiert; hat sich erst einmal an irgendeiner Stelle eine Spur Eisenoxyd gebildet, so wird die Oxydation rascher vorwärts schreiten. Nachdem einige Teilchen des schon gebildeten Eisenoxyds Feuchtigkeit und Sauerstoff aufgenommen haben, wird die zunächst liegende Stelle mit deren Hilfe oxydiert usw., so daß der erwähnte volkstümliche Ausdruck durchaus das Richtige trifft.

Andererseits nun hat die Natur auch Substanzen erzeugt, die das Eisen vor der Oxydation schützen; es gibt eine Reihe von Stoffen, die den Oxydationsprozeß hemmen oder ganz aufheben; diese Eigenschaft haben zunächst alle Hydroxyde und ferner Salze, die infolge Hydrolyse alkalisch reagieren, also Hydroxylionen enthalten.

Einfluß der
Hydroxyde.
Oxydations-
verzögerung.

Solche Schutzwirkung üben demnach aus: Natronlauge, Kalilauge, Ammoniakwasser, Calciumhydroxyd u. a., und von den

¹⁾ Proceedings of the American Society for Testing Materials. Philadelphia; Penna. VIII. 1908.

Salzen Soda, Pottasche, Wasserglas, Alkaliphosphate und Alkaliacetate und Borax. So oxydiert sich Eisen auch nicht in einem feuchten Gemisch von Sauerstoff und Ammoniak, da letzteres die Schutzwirkung ausübt.

Je stärker die Alkalität einer solchen Flüssigkeit ist, je größer die Konzentration der Hydroxylionen ist, um so größer ist auch die Schutzwirkung; so wirken Kalilauge und Natronlauge am stärksten, Borax am schwächsten.

In quantitativer Beziehung braucht die Menge der vorhandenen Hydroxylionen gar nicht groß zu sein, um diese Schutzwirkung hervorzurufen. Die Konzentration von Hydroxylionen, wie sie etwa in $\frac{1}{20}$ molarer Lösung von Kaliumhydroxyd vorhanden ist (etwa 2,8 Gew.-T. KOH in 1 L), reicht vollständig aus, um diesen Zweck zu erreichen.

Entsprechend der geringeren Konzentration an Hydroxylionen in einer Lösung von Soda müssen etwa 17,2 g wasserhaltiges Natroncarbonat in 1 l gelöst werden, um eine schützende Wirkung hervorzubringen; dagegen ist eine Lösung, die etwa nur 15,7 g Soda in 1 l enthält, schon unwirksam.

Eine bestimmte Konzentration der Hydroxylionen ist also notwendig.

Borax übt noch eine geringere Schutzwirkung aus, als die kohlen-sauren Alkalien, Soda und Pottasche, da der Grad seiner Hydrolyse in $\frac{1}{10}$ normalen Lösungen nur 0,5 v. H., für Soda aber 3,17 v. H. beträgt.

Außer den Hydroxyden üben noch eine solche Schutzwirkung aus: Chromate und Dichromate¹⁾, die Alkalien und Chromichlorid²⁾, obwohl diese beiden letzteren Lösungen Wasserstoffionen enthalten.

Einfluß der
Chromate,
Dichromate
u. des Chrom-
chlorids.

Auch hier ist eine bestimmte Konzentration der Chromationen notwendig, z. B. für Kalidichromat, damit eine Schutzwirkung hervorgerufen werden kann; und auch die chemische Konstitution des Eisens ist dabei maßgebend. So werden nach Kröhnke³⁾ nur die gußeisernen Rohre in einer $\frac{1}{100}$ -Normal-lösung von Kalidichromat oxydiert, während bei den schmiedeeisernen Rohren bei dieser Konzentration der Dichromationen

¹⁾ Journ. Franklin Inst. 111. 1908.

²⁾ P. Rohland. Über die Oxydationsverzögerung des Eisens durch Chromichlorid. Ztschr. f. Elektrochem. 22. 1909.

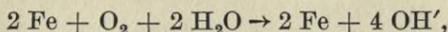
³⁾ Dr. O. Kröhnke, Über das Verhalten von Guß- und Schmiedeeisen in Wasser, Salzlösungen und Säuren. München 1911.

ihre verzögernde Wirkung zur Geltung kommt; ebenso verhalten sich diese Rohre in einer $1/1000$ -Normallösung.

In einer $1/10000$ -Normallösung dagegen wurden beide Eisensorten in gleich starker Weise oxydiert. Hier ist eben der beschleunigende Einfluß der Wasserstoffionen größer als der verzögernde der Dichromationen.

Demnach rufen Hydroxyionen in bestimmter, nicht zu geringer Konzentration, die Chromat-, Dichromat- und Chromiionen, eine Schutzwirkung hervor, während Wasserstoff-, Chlor- und Sulfationen die Oxydationsgeschwindigkeit beschleunigen.

Merkwürdig ist auch, daß die Bildung von Hydroxyionen die Oxydation mit herbeiführt nach dem schon erwähnten Oxydationschema:



ihre geringe Konzentration sie hindert und erst ihre größere Konzentration eine andauernde Schutzwirkung hervorruft. Die Erklärung¹⁾, daß der schützende Einfluß der Chromationen von einer intermediären Bildung von Wasserstoffsperoxyd und dessen Zerstörung durch diese herrührt, ist wenig wahrscheinlich.

In bezug auf die Schutzwirkung der Chromiionen ist die Vermutung denkbar, daß sich zunächst und vorübergehend Chrom im metallischen Zustand auf dem Eisen abscheidet.

Eine gemeinsame Erklärung für die Wirksamkeit aller genannten Ionenarten scheint zurzeit nicht möglich zu sein.

Auch die schon erwähnte elektrolytische Oxydationstheorie gibt keine zureichende Erklärung für diese Phänomene. Auf Grundlage dieser Theorie läßt sich zwar erklären, daß die Hydroxyionen in größerer Konzentration die Oxydation verzögern, indem sie die angreifende Wirkung der Wasserstoffionen durch Bildung von Wasser verhindern, andererseits den Sauerstoff unschädlich machen; das vollständige Fehlen von Wasserstoffionen in konzentrierten Lösungen der Hydroxyde — die ja in verdünnten noch vorhanden sein können — wäre danach als Ursache der Schutzwirkung anzusehen.

Alkaldichromate und Chromichlorid reagieren aber infolge von Hydrolyse sauer, sie enthalten also Wasserstoffionen in größerer Konzentration und müßten demnach, statt die Oxydation zu verzögern, sie beschleunigen.

¹⁾ Proceed. chem. Soc. 23. 63. 1905.

Diese Tatsache läßt sich vorläufig nicht mit der elektrolytischen Oxydationstheorie in Einklang bringen; man müßte denn sagen, daß die Kationen, die Dichromat- und Chromionen, die Wirkung der Wasserstoffionen kompensieren.

Passivität
des Eisens.

Diese ganze Frage hängt mit der sog. Passivität des Eisens zusammen, die noch keine restlose Beantwortung gefunden hat. Eisen bleibt ferner auch unter konzentrierten Säuren, z. B. Salpetersäure, unoxydiert.

Faraday, Wiedemann und andere erklären diese Erscheinung durch die Bildung einer ganz dünnen, nicht sichtbaren Oxydschicht, die das Eisen vor der Oxydation schützt. Mit dem bloßen Auge kann sie nicht wahrgenommen werden, da es zur Erkennung solcher sehr dünnen Schichten ungeeignet ist; Schichten unter $4 \mu\mu$ sind für das Auge auch unter günstigen Umständen nicht zu erkennen.

Keine Oxyd-
schicht.

Wohl aber müßte sie nach einer von J. Müller und J. Königsberger¹⁾ aufgefundenen Methode sichtbar sein; daher kommen diese Forscher zu dem Resultate, daß diejenigen Theorien, welche die Passivität des Eisens durch eine Oxydschicht zu erklären suchen, mit den Tatsachen nicht zu vereinigen sind.

Ferner ist noch zu beachten, daß diese Schicht kontinuierlich sein müßte, da eine diskontinuierliche die Oxydation des ganzen Eisenstückes herbeiführen müßte.

Jedenfalls ist nachgewiesen, daß diese schützende Oxydschicht nicht vorhanden ist, und die Frage nach den Ursachen der Passivität des Eisens, seines Verhaltens gegen konzentrierte Säuren, Hydroxyde, Chromate und Dichromate, Chromichlorid, ist noch nicht restlos beantwortet, trotz aller theoretischen und praktischen Fortschritte der Elektrochemie, trotzdem schon zahlreiche Forschungsexpeditionen nach dieser Richtung unternommen worden sind. Es liegt hier noch ein Arbeitsfeld vor, dessen Bebauung sowohl theoretisch wie technisch noch wertvolle Früchte zu geben verspricht.

Außer der Eigenschaft des Eisens, unter alkalischen Flüssigkeiten unoxydiert zu bleiben, gereichen dem Eisenbeton noch einige andere Eigenschaften des Eisens zum Nutzen.

Zug- und
Biegungs-
spannung
des Eisens.

Beton allein nämlich hat nicht die Fähigkeit, größere Zug- und Biegungsspannungen, z. B. bei Balken, Unterzügen, ohne Zerstörung seiner zusammenhängenden Teile, aufzunehmen; das

¹⁾ Zeitschr. f. Elektrochemie 13. 40. 1907. Über das anodische und kathodische Verhalten von Eisenspiegeln und die Passivität des Eisens.

Eisen hat diese Eigenschaften, da die hierzu benutzten Sorten in hohem Maße formänderungsfähig sind.

Außerdem wird das Eisen bis zu einer bestimmten Spannungsgrenze an Bewegung im Beton gehindert.

Dieses Phänomen wird teils auf direktes Haften des erhärteten Betons am Eisen, teils auf die Zusammenziehung des Betons beim Erhärten, wodurch das Eisen festgeklemmt wird, zurückgeführt.

Haftintensität
des Eisens.

Beide Tatsachen sind richtig; indessen sind bisher die Ursachen dieses Verhaltens noch nicht angegeben worden; es ist begründet in der kolloidchemischen Natur des Zements bzw. Betons, wie das im Kapitel IV näher dargelegt werden wird.

Jedenfalls aber hat dadurch der Eisenbeton eine größere Dehnungsfähigkeit gewonnen.

Die für die Verwendung im Eisenbeton nötigen Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften des Eisens sind am meisten in dem kohlenstoffärmeren Schmiedeeisen zu finden, das als Schweißeisen und Flußeisen bezeichnet wird; sein Gehalt an Kohlenstoff beträgt etwa 5 v. H.

Das kohlenstoffreichere Gußeisen läßt sich nicht verwenden, weil Zugfestigkeit und Formänderungsvermögen geringer sind, und Stahl hat ebenfalls einen höheren Gehalt an Kohlenstoff.

Für benutzbares Handelsflußeisen sind folgende Konstanten ermittelt worden:

Proportionalitätsgrenze: 20—24 kg/qm.

Fließgrenze: 24—30 kg/qm.

Bruchgrenze: 38—45 kg/qm.

Elastizitätsmodul: 2 000 000—2 100 000.

Dehnung: 20—25 v. H.

Querschnittsverminderung: 40—60 v. H.

Was die Form des Eisens anbetrifft, so wird Thacher-Eisen, Ransome-Eisen, Johnson-Eisen, Kahnsches Eisen angewendet. Speziell das zuerst genannte Eisen weist Erhöhungen und Einschnürungen auf, um die Haftfestigkeit zwischen Beton und Eisen zu erhöhen, indessen macht die kolloidchemische Natur des Zements Unebenheiten unnötig.

Form des
Eisens.

Schließlich ist für den Eisenbeton ein höchst günstiger Umstand das zufällige Zusammentreffen in bezug auf die Größe der Ausdehnungskoeffizienten des Eisens und des Betons; sie stimmen nahezu überein, und zwar beträgt der Ausdehnungs-

Ausdehnungs-
koeffizienten
des Eisens
und des Be-
tons.

koeffizient für Stabeisen: 0,00001235 für 1°; der für Beton aus Portlandzement: 0,00001370 für 1°.

Dieser glückliche Zufall kommt dem Eisenbetonbau sehr zu-statten.

Denn ein Verbundkörper aus Eisen und Beton würde unbrauchbar sein bei größerer Differenz der Ausdehnungskoeffizienten, da die durch ungleichmäßige Ausdehnung bewirkten Spannungen Risse im Beton zur Folge hätten. Erst recht aber würde, wäre zwischen beiden Konstanten ein größerer Unterschied, als er tatsächlich vorhanden ist, die Feuersicherheit und Feuerfestigkeit des Eisenbetons in Frage gestellt sein; denn die Differenzen der Ausdehnungskoeffizienten wachsen proportional mit der Zunahme der Temperatur und müßten bei hoher Temperatur zur Zerstörung des Eisenbetons führen.

Auch hier fällt ein Vergleich mit anderen unedlen Metallen sehr zugunsten des Eisens aus. Auch hier scheint es wiederum, als ob die Natur es geradezu auf einen Endzweck abgesehen hätte; denn Kupfer z. B. hat den Ausdehnungskoeffizienten $\frac{1}{58000}$, Zink $\frac{1}{34000}$; auch aus diesem Grunde, außer dem oben angeführten, ist die Kombination zwischen diesen Metallen und dem Beton unmöglich.

Die Eigenschaft des Eisens, unter alkalischen Flüssigkeiten unoxydiert zu bleiben, seine Fähigkeit, größere Zug- und Bie-gungsspannungen aufzunehmen, die Größe seines Aus-dehnungskoeffizienten — alles das sind Faktoren, die erst den Eisenbetonbau ermöglichen und seine vorzüglichen Eigenschaften bedingen.

III.

Der Zement.

Von den verschiedenen Zementarten, den Romanzementen, den Puzzeolanen und Trassen, den Schlackenzementen, Portland- und Eisenportlandzementen, kommen nur die beiden letz-teren für den Eisenbetonbau in Betracht.

Die Gleichmäßigkeit ihrer Zusammensetzung, die hohen Be-träge der Druck- und Zugfestigkeiten, die Nichtoxydation des Eisens und seine Entrostung in diesen Zementen lassen sie als bestes Baumaterial für den Eisenbeton erscheinen.

Die Rohmaterialien des Portlandzements sind Tone, Mergel und Kalksteine, die in geeigneter Mischung bei ca. 1500° zusammen gebrannt werden, so daß eine Adsorptionsverbindung des in Calciumoxyd umgewandelten Calciumcarbonats mit den silicium-, aluminium- und eisenhaltigen Bestandteilen der Mischung gebildet wird.

Portland-
zement.

Der Eisenportlandzement wird aus sehr fein gemahlener Hochofenschlacke und Kalksteinmehl durch Brennen bei 1400 bis 1600° hergestellt; ihm wird noch reine Hochofenschlacke, die mit kaltem Wasser abgeschreckt und dadurch körnig gemacht worden ist, zugesetzt; er besteht demnach aus 70% Zement und 30% granulierter Hochofenschlacke.

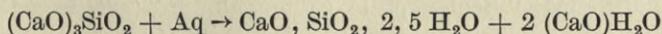
Eisenport-
landzement.

Die Erkennung der chemischen Konstitution des Portlandzements hängt vielfach mit den wesentlichen Eigenschaften des Eisenbetons zusammen.

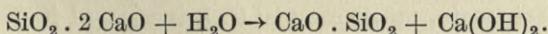
Jahrzehntelang hat man nach der Konstitution und der Erhärtungsursache des Zements vergeblich geforscht. Das Erhärtungsproblem spiegelt in seiner Entwicklung alle Phasen der Entwicklung der chemischen Theorien wieder. Dieses interessante Problem hat selbst Männer wie Pettenkofer kurze Zeit beschäftigt.

Konstitu-
tion des
Zements.

In seinem ersten Stadium wurde die Ursache des Erhärtungsprozesses der Vereinigung der aufgeschlossenen Kieselerde mit dem Calciumhydroxyd zugeschrieben, also einem Vorgang, der auf eine Salzbildung hinausläuft. Die an sich ganz richtige Beobachtung, daß von dem sich hydratisierenden und erhärtenden Zement Calciumhydroxyd abgespalten wird, führte zu der Vermutung, daß Zersetzung stark basischer Silicate durch das Wasser nach Le Chatelier¹⁾ die Basis der Erhärtung bildet; etwa in folgender Weise:



und nach Zulkowsky²⁾ nach dem Schema



Dann machte der Forschungsweg eine Schleife und kehrte eine Zeitlang zum Ausgangspunkt zurück. Tomëi nahm an, daß die Stabilität der kalkhaltigen Zusammensetzungen mit der Zeit im Zement zunimmt, und daß in ihm ein Teil der Kieselsäure eine Verbindung mit dem Kalk eingeht; A. Hauenschield er-

¹⁾ Tonindustriezeitung 26, 1032. 1902.

²⁾ Chem. Ind. 24, 290. 1901.

klärte in ähnlicher Weise den Erhärtungsprozeß, indem er annahm, daß die Affinität des Kalks zu der Kieselsäure mit der Zeit der Erhärtung, und zwar in dem Maße wächst, als die Silicate weniger basisch sind.

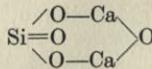
Dann kehren die neueren Auffassungen wieder; nach O. Rebuffat hat der Erhärtungsvorgang die Zersetzung eines basischen Silicats zur Grundlage, und Lj amin zieht den Schluß, daß während der Erhärtungsperiode Calciumhydroxyd in mit der Zeit zunehmender Menge ausgeschieden wird.

Nach J e x bewirken den Erhärtungsprozeß im Portlandzement die Kalkorthosilicate, Ca_2SiO_4 , die sich aus den Kalkmetasilicaten bei Gegenwart freien Kalks bilden, indem durch Einfluß des Wassers ein Molekül H_2O frei wird und ein Metasilicat entsteht.

Wie man sieht, laufen die Forschungsergebnisse im wesentlichen nach zwei Richtungen; Bildung von Kalksilicaten und ähnlichen stöchiometrischen Verbindungen, und, da man die Abscheidung von Calciumhydroxyd während des Abbindens und in der ersten Periode der Erhärtung beobachtete, Zersetzung solcher.

Als dann in der organischen Chemie die Strukturtheorie Triumphe feierte, zögerte man nicht, auch ihre Lehre auf das Erhärtungsproblem zu übertragen.

Nach der Hypothese von A. Meyer¹⁾ wird ein Metasilicat von der Konstitution:



als Erhärtungsursache angesehen, weil es das Calciumoxyd als anhydridartiges Gebilde gebunden enthält.

Endlich hat sich die Kolloidchemie, in Verbindung mit physikalischer Chemie, dieses Problems bemächtigt und die undurchdringlichen Schleier, die es umgab, größtenteils gelüftet.

Nur ein alter Zementtechniker, Dr. Frühling, hatte auf den richtigen Weg gewiesen, indem er als Aufgabe der Zementfabrikation bezeichnete, möglichst viel Calciumoxyd in den Zement in einer Form zu bringen, in der er sich ohne Volumenvergrößerung langsam hydratisiert.

Die Vermutung, daß Kolloidstoffe bei der Hydratation und Erhärtung des Zements von wesentlichster Bedeutung sind, war allerdings nicht sehr naheliegend; trotzdem ist sie die allein richtige²⁾.

¹⁾ Tonindustriezeitung 26, 1895. 1902.

²⁾ P. Rohland, Die Kolloidstoffe bei der Erhärtung des Zements. Ton-

Die Erhärtungsursache des Zements ist durchaus nicht in der Bildung einer oder mehrerer, in stöchiometrischem Verhältnis stehender Verbindungen zu suchen. Weder die zahlreichen vorliegenden Analysenresultate der Klinker und des hydratisierten Portlandzements, noch die Versuche, Calciumsilicate, Aluminate usw. synthetisch darzustellen und mit Verbindungen im Zement zu identifizieren, haben ein befriedigendes Resultat ergeben.

Das von C. Unger¹⁾ im elektrischen Ofen dargestellte Monocalciumsilicat, CaO , SiO_2 , erhärtet mit Wasser angerührt sehr langsam, seine Festigkeit war nach 8 Wochen noch gering (4,5 v. H. Zugfestigkeit); auch das ebenso dargestellte Bicalciumsilicat, 2CaO , SiO_2 , hatte geringe Festigkeit; es erreichte nach 8 Wochen, davon 6 Wochen unter Wasser, eine Festigkeit von 8 kg Zug. Beide Silicate sind der Hydrolyse unterworfen.

Ferner ist durch Versuche von Day und Shephard²⁾ endgültig festgestellt worden, daß in der Reihe der Verbindungen der beiden Bestandteile CaO und SiO_2 weder das Dicalciumtrisilicat 2CaO , 3SiO_2 , noch das Tricalciumsilicat, 3CaO , SiO_2 , auf deren Bildung vielfach, auch von Le Chatelier, die Erhärtung des Zements zurückgeführt wird, existenzfähig sind.

Auch die Versuche, mit Hilfe von Dünnschliffen³⁾ diese Fragen zu lösen, haben bisher nicht dazu geführt, die Erhärtungsursache aufzufinden; auch die Untersuchungen von Törnebohm⁴⁾, der als Erhärtungsursache die Bildung des Alit ansieht, geben keine befriedigende Antwort.

Dünnschliffe.

Der Alit, der durch vier- und sechsseitige Kanten, ferner durch gewisse optische Eigenschaften gekennzeichnet ist, ist kein bestimmtes chemisches Individuum in stöchiometrischem Sinne, wohl auch kein mineralogisches; er soll durch Verbindung eines Silicates mit einem Aluminat entstanden sein oder eine isomorphe Mischung eines Tricalciumsilicates mit einem Calciumsilicat darstellen.

Alit.

industriezeitung **30**, 1820. 1906. Die Wirkungen der Kolloide bei der Erhärtung des Zements. Zeitschr. f. Elektrochemie **13**, 97. 1907.

¹⁾ Die Entwicklung der Zementforschung. Inaugural-Dissertation. Stuttgart.

²⁾ Tonindustriezeitung **30**, 124. 1906.

³⁾ Arbeit der metallographischen Abteilung der Kgl. Materialprüfungsanstalt; Groß-Lichterfelde. Berichte d. Deutsch. chem. Gesellschaft **8**, 295. 1908.

⁴⁾ Die Petrographie des Portlandzements. Stockholm 1897.

Vergleicht man aber die Zusammensetzung des Alits mit der eines normalen Portlandzements, wie sie die Analyse ermittelt, so erkennt man, daß sie bei beiden Stoffen annähernd gleich ist; das Verhältnis der Mengen des Kalkes zur Kieselsäure ist ungefähr dasselbe; auch der Gehalt an Tonerde, Magnesia, Alkalien ist angenähert der gleiche.

Tabelle I.

	Alit	Zement
SiO ₂	19,48	19,00
Al ₂ O ₃	7,83	8,17
CaO	67,60	62,58
MgO	3,00	2,22
Na ₂ O	0,90	} 1,83
K ₂ O	1,19	

Vielmehr ist die Konstitution des Zements folgendermaßen: das Calciumoxyd befindet sich im Zustand einer Adsorptionsverbindung, der während des Sinterungsprozesses entstanden ist; bei der Sinterung wird zugleich das Maximum der Erhärtungsfähigkeit erreicht, während diese bei Steigerung der Temperatur und bei Annäherung an die Schmelzpunkte des Stoffgemenges wieder abnimmt.

Die Sinterung ist keine oberflächliche Schmelzung, wie sie öfters bezeichnet wird; denn die Eigenschaften der Stoffe im gesinterten Zustand sind wesentlich andere als im geschmolzenen.

Diese Sinterung ist dadurch gekennzeichnet, daß in einem inhomogenen Gemenge, wie es die Rohmasse des Portlandzements darstellt, Teile sich bereits im geschmolzenen Aggregatzustand befinden, während andere Teile in der festen Formart noch verharrten und von den flüssigen durchtränkt werden; der bereits flüssige Anteil vermag unter Schmelzpunkterniedrigung von der festen Substanz aufzunehmen.

Beim Anrühren des Zements mit Wasser werden die Hydroxyde des Siliciums, Aluminiums und Eisens im kolloiden Zustande abgespalten und durch das gleichzeitig hydrolytisch abgespaltene Calciumhydroxyd langsam koaguliert.

Die Abspaltung vom Calciumhydroxyd läßt sich leicht mit roter Lackmustinktur oder auch einer alkoholischen Lösung von Phenolphthalëin nachweisen.

Es ist ferner festgestellt worden¹⁾, daß von 2,035 g fein zerteiltem Portlandzement nach vierzehn Tagen von 40 kg Wasser 1,752 g gelöst waren, während der Rest aus abgeschiedenen ungelösten Hydroxyden des Siliciums, Aluminiums und Eisens bestand.

Auch Zement in der ersten Erhärtungsperiode ist noch dieser hydrolytischen Spaltung unterworfen; solcher Zement, der zwei Monate hindurch mit 60 l destillierten Wassers in Berührung gewesen war, hatte 1,408 g Calciumhydroxyd und 1,112 g Kieselsäure abgespalten²⁾.

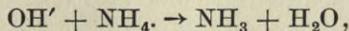
Diese Tatsache war schon länger bekannt; es war aber aus ihr keine weitere Folgerung gezogen worden.

Ferner adsorbieren die erwähnten abgespaltenen Kolloidstoffe, außer Farbstoffen und kolloiden Stoffen, selbst die Kohlensäureionen vollständig³⁾, die im Anmachewasser vorhanden sind, und dieser Adsorption schließt sich die Bildung von Calciumcarbonat aus diesen und dem hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyd, das außerdem noch das Kohlendioxyd der Luft aufnimmt, an.

Die unter Aufquellen koagulierten kolloiden Stoffe wirken aber nun wie Leim oder Kleister und verhindern ein weiteres Vordringen des Wassers in das Innere des erhärtenden Zements und den weiteren Hydrolyisationsvorgang.

Die Abspaltung von Calciumhydroxyd hört nach längerer Zeit auf, wie das wiederum leicht mit Phenolphthalëin oder Ammoniumsalzen nachgewiesen werden kann.

Wenn die hinzugesetzten Ammoniumionen in keine Reaktion mehr treten können, nach dem Ionenschema:



so ist erwiesen, daß die hydrolytische Spaltung beendet ist.

Mit der Verlangsamung der Abspaltung des Calciumhydroxyds schreitet der Erhärtungsvorgang, parallel laufend, fort.

Man kann auch sagen: eigentlich ist der Bestand des Zements in der ersten Zeit der Berührung mit Wasser wegen der geringen Konzentration der Hydroxytionen des abgespaltenen, schwerlöslichen Calciumhydroxyds hydrolytisch unmöglich; der Zement

¹⁾ Journ. prakt. Chem. **62**, 318.

²⁾ G. Feichtinger, Chem. Technologie der Mörtelmaterialien.

³⁾ P. Rohland, Internationales Zentralblatt f. Baukeramik. Wien. **24**, 744. 1909. Über die Adsorption durch Zemente. — Zeitschr. f. anorg. Chemie **56**, 46. 1907. Über die Adsorptionsfähigkeit des Si, Al und Fe.

müßte demnach immer weiter zerfallen, wenn eben nicht durch die fortschreitende Hydrolyse mit der Zeit die Konzentration der Hydroxylionen hinreichend groß würde, so daß dann nunmehr die Abspaltung aufhören muß. Demnach ist, wenn es auch etwas paradox klingt, die Hydrolyse Vorbedingung für die hydraulischen Eigenschaften des Zements.

Quellung.

Auch die Erscheinung der Quellung ist schon früher beim Zement beobachtet worden, hatte aber bisher noch keinen zureichenden Erklärungsgrund gefunden; auch sie ist in der Bildung dieser Kolloidstoffe begründet.

Fassen wir nochmals zusammen: Was geschieht nun beim Abbinden und Erhärten des Zements?

Erstens zweifellos die Bildung von Solkörpern, die dann in Gelkörper übergehen¹⁾.

Zweitens ist ebenso unumstößliche Tatsache, daß Calciumhydroxyd hydrolytisch abgespalten wird und dann in Carbonat übergeht.

Die entstandenen Gelkörper bewirken nun, daß die Hydrationsgeschwindigkeit des Zements keine plötzliche wie beim Ätzkalk ist, sondern einen geringen Betrag hat; etwa so, wie bei sehr hoch gebranntem und stark zusammengesintertem Calciumoxyd, das, bei 15° mit Wasser angerührt, ganz langsam abbindet und erhärtet.

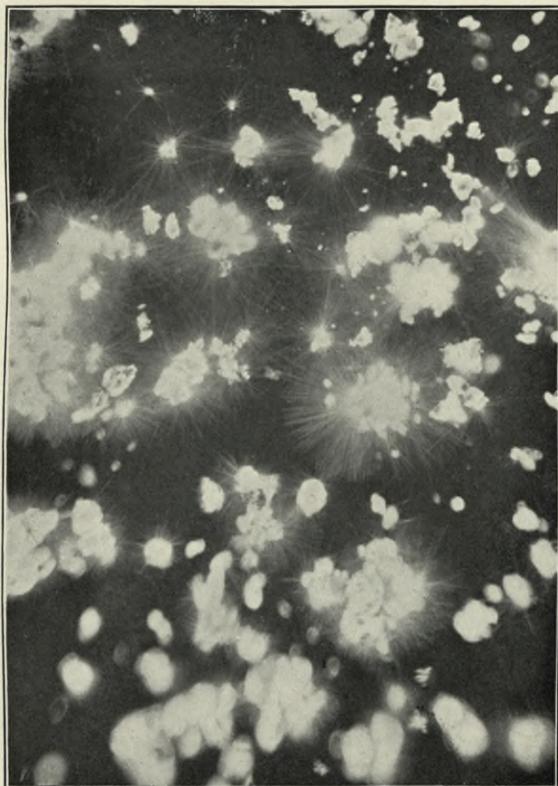
Das sind jedenfalls die beiden Hauptvorgänge während des Abbindens und Erhärtens. Durch die schönen mikroskopischen Präparate von H. Ambronn - Jena ist die Bildung der Kolloidstoffe und deren Koagulation ad oculos demonstriert worden. (Tafel I.)

Kommt ein Zementpartikelchen mit Wasser in Berührung, so umgibt es sich nach einiger Zeit mit einer Zone von kolloiden Stoffen; zugleich beginnt auch die Kristallbildung von Calciumhydroxyd bzw. Carbonat²⁾.

¹⁾ P. Rohland, Die Kolloidstoffe bei der Erhärtung des Zements. Tonindustriezeitung **30**, 118. 1906 l. c.

²⁾ Das schöne Photogramm (Tafel I) verdanke ich der Liebenswürdigkeit des Herrn Professor Dr. Ambronn; es ist in der Zeißschen Werkstätte nach einem frischen Präparat aufgenommen worden.

Die strahlenförmig die Gelkörper umgebenden Nadeln bilden sich, wie mir Herr Professor Dr. Ambronn - Jena freundlichst mitteilte, zuerst auf Zusatz von Wasser zum Zementpulver, schon vor der Bildung der Gelkörper, und sind nur bei der unter der Abbildung angegebenen Beleuchtungsmethode sichtbar, wovon ich mich selbst überzeugt habe; jedenfalls sind diese Nadeln ein sehr schwer löslicher und leicht kristallisierender Körper.



Zement im Zustand des Abbindens.

Vergr. ca. 135fach. Dunkelfeldbeleuchtung mit Paraboloidkondensor
(nach H. Ambrom).

Ferner ist zu beachten, daß die Bildung von Calciumcarbonat nur an den Rändern des Präparats erfolgen kann, wo die Luft bzw. Kohlensäure Zutritt hat, und daß demnach der Abbinde- und Erhärtungsprozeß des Zements bei solchen Präparaten nicht vollständig identisch mit dem normalen ist; denn in diesem Falle wird sogleich und in größerer Menge die Kohlensäure vom hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyd aufgenommen und in Carbonat verwandelt.

Nach der Untersuchung von H. Keisermann¹⁾ sind diese strahlenförmigen Nadeln wasserhaltiges Calcium-Monosilicat, da in wässriger Lösung nur einbasische Silicate bestehen können. Dieses würde aber aus den eben angegebenen Gründen für den Erhärtungsprozeß keine wesentliche Bedeutung haben.

Daraus kann man auf die Konstitution des vollständig erhärteten Zements wie folgt schließen: er besteht im wesentlichen an seiner Oberfläche aus Calciumcarbonat, das aus dem hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyd, dem Kohlendioxyd der Luft entstanden ist, in seinen darunterliegenden Schichten aus den koagulierten Kolloidstoffen, den Gelkörpern, und den nadelförmigen Kristallen; auch findet sich noch kristallinisches Calciumhydroxyd, das allmählich, je nach der Erhärtungsdauer, in Calciumcarbonat übergeht.

Gerade die hydraulischen Funktionen des Zements werden aber durch die Abspaltung und die Koagulation dieser Kolloidstoffe bedingt.

Nach dem Ausgeführten erledigt sich die einst vielfach erörterte Frage, ob freier Kalk und in welcher Menge im Zement vorhanden ist, von selbst²⁾.

Freies Calciumoxyd.

Hierzu wurden die mannigfachsten Methoden und Mittel angewendet; so die Trennung des freien Kalkes vom übrigen Zement mit Hilfe der Retgerschen Schwebemethode, die auf die Verschiedenheit der spezifischen Gewichte des Calciumoxyds und des Zements sich gründet; ferner wurden angewendet Salzsäure, Lösungen von Ammoniumchlorid und Ammoniumacetat, Zuckermilch; alle diese Agentien sind aber in Wasser gelöst, und, wie wir gesehen haben, spaltet eben das Wasser aus dem Zement „freien“ Kalk ab.

1) Kolloidchemische Beihefte. Bd. I. Th. Steinkopff-Dresden.

2) P. Rohland, Der Portlandzement vom phys.-chem. Standpunkt. Leipzig 1903. Quandt & Händel.

Dieser Fehler sollte nun dadurch vermieden werden, daß man keine wässerige, sondern eine äthylalkoholische Lösung anwandte, so Jod in einer solchen; aber durch eine äthylalkoholische Jodlösung findet eine tiefer gehende Einwirkung auf den Zement statt, indem sich Jodoform, Calciumjodid usw. bilden; und eine äthylalkoholische Lösung von Phenolphthaläin vermag eben auch nur den Nachweis zu führen, daß Hydroxylionen in der Lösung sind, aber nicht anzugeben, woher sie stammen.

Freier Kalk ist also nicht im nichthydratisierten Zement, wohl aber wird Calciumhydroxyd in Berührung mit Wasser aus ihm abgespalten. Das ist bei normalen Zementen der Fall; in schlecht hergestellten Zementen kann freier Kalk in der Form von Ätzkalk vorhanden sein; dann treten unter Wasser „Treiberscheinungen“ auf; es bilden sich Risse und Sprünge, die der sich hydratisierende Ätzkalk hervorruft.

Einfluß von
Zusätzen auf
die Abbinde-
zeit.

Besondere Berücksichtigung verdienen ferner Zusätze, größtenteils Elektrolyte, welche die Hydratationsgeschwindigkeit des Zements teils verzögern, teils beschleunigen, die Abbindezeit verkürzen oder verlängern.

Solche sind Chloride, wie Chlornatrium, Chlorcalcium, kohlensaure Salze; Soda, Pottasche; schwefelsaure Salze, Natriumsulfat, Gips, ferner Borax, Kalidichromat u. a.

Bei einigen dieser Substanzen wechselt die Richtung ihres Einflusses auf die Hydratationsgeschwindigkeit; Chlornatrium verhält sich in geringer Konzentration indifferent, in größerer verzögert es die Hydratationsgeschwindigkeit, Chlorcalcium wirkt in geringer Konzentration als Verzögerer, in stärkerer als Beschleuniger, kohlensaure Salze verkürzen die Abbindezeit, während schwefelsaure mit einer Ausnahme sie verlängern, so auch der technisch fast allein von diesen Stoffen angewandte Gips; Borax und Kalidichromat verzögern die Hydratationsgeschwindigkeit; Aluminiumchlorid beschleunigt, während Eisenchlorid verzögert.

Beim Kali-Alaun macht der eine der Komponenten $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ eine stark beschleunigende, der andere K_2SO_4 eine verzögernde Beeinflussung geltend, so daß als Gesamtwirkung eine verminderte Beschleunigung erscheint.

Auch die phosphorsauren Salze verzögern die Geschwindigkeit der Vorgänge, die beim Abbinden stattfinden.

Zusätze im festen Aggregatzustande erzielen eine viel geringere Wirkung, als im gelösten, wie aus folgenden Versuchsergebnissen hervorgeht:

Tabelle II.

tZ	tL	H ₂ O	% L	% Z	ϑ	W
Zement A (ohne Zusatz):						
25°	25°	20%	0	0	2'	17'
Gips, Dihydrat, CaSO ₄ + 2 aq, fest, verzögert:						
25°	25°	20%	—	0,7	10'	17°
Kalidichromat, K ₂ Cr ₂ O ₇ , gelöst, verzögert:						
25°	25°	20%	2,9	0,7	250'	18°
Zement B (ohne Zusatz):						
17°	17°	28,5%	0	0	10'	15°
Borax, Na ₂ B ₄ O ₇ , 10 H ₂ O, fest, verzögert:						
17°	17°	28,5%	—	2,43	28'	15°
Borax, gelöst:						
18°	18°	28,5%	1,23	2,43	300'	15°
Zement C:						
17°	19°	25,9%	0	0	170'	15°
Soda, wasserfrei, Na ₂ CO ₃ , fest, beschleunigt:						
18°	19°	25,9%	—	1,38	13'	15°
Soda, gelöst:						
18°	19°	25,9%	3,99	1,38	9'	—

In vorstehender Tabelle bedeutet:

tZ die Temperatur des Zements,

tL die Temperatur der Lösung,

H₂O Menge des angewandten Wassers,

% L Prozentgehalt der zugesetzten Lösung,

% Z Prozentgehalt des Zements an dem Zusatz,

ϑ Hydratationszeit (Abbindezeit) in Minuten,

W Wärme des Versuchsraums.

Zweifellos ist die Wirkung eines solchen beschleunigenden oder verzögernden Zusatzes im gelösten Zustande viel größer als im festen; wegen der viel größeren Löslichkeit der Soda tritt der Unterschied zwischen ihrer Wirkung in festem und gelöstem Zustand weniger stark als beim Borax hervor; auch die in festem Zustand zugesetzte Soda löst sich rasch auf und wirkt als solche.

In quantitativer Hinsicht gestaltet sich die Beziehung zwischen den zugesetzten Mengen und ihren Wirkungen so, daß zwischen beiden eine angenäherte Proportionalität stattfindet, wie aus den weiter unten angegebenen Versuchen hervorgeht.

Für Zusätze in geringer und mittlerer Konzentration ist die Wirkung relativ größer als für sehr starke, bei Langsambindern ist ihre Wirkung stärker als bei Raschbindern.

Bei gleichzeitiger Gegenwart von zwei beschleunigenden Zusätzen, z. B. Soda in geringer Konzentration und Aluminiumchlorid, findet nicht nur eine Addition ihrer Wirkungen statt, sondern diese gehen über die Summierung hinaus.

Bei gleichzeitiger Anwesenheit von zwei verzögernden Zusätzen, z. B. Borax und Kalidichromat, tritt umgekehrt eine gegenseitige Schwächung ihrer Wirkungen ein.

Wirkt der eine Zusatz, z. B. Soda, beschleunigend, der andere, z. B. Kalidichromat, verzögernd, so kann Kompensation bei Anwendung gleicher Mengen eintreten.

Tabelle III.

Na_2CO_3 Soda:

tZ	tL	H_2O	% L	% Z	ϑ
19	18	25,9	0	0	23'
19	19	25,9	0,0034	0,00174	19'
16	16	25,9	0,0497	0,01747	14'
19	18	25,9	0,1996	0,0695	11'
19	19	25,9	0,299	0,1049	9'
17	19	25,9	0	0	220'
18	19	25,9	0,397	0,111	210'
18	18	25,9	0,793	0,279	65'
18	18	25,9	1,993	0,695	15'
18	19	25,9	3,990	1,381	5'

Tabelle IV.

Aluminiumchlorid AlCl_3 :

tC	tL	H_2O	% L	% Z	ϑ
19,5	19,8	23	0	0	308'
21,5	19,8	23	0,49	0,149	284'
18,8	18,0	23	1,31	0,390	233'
17,7	17,5	23	2,50	0,799	127'
19,3	18,4	23	4,00	1,23	91'
19,7	18,6	23	5,00	1,70	68'

Tabelle V.
Kaliummonosulfid K_2S :

tC	tL	H_2O	% L	% C	ϑ
16,8	15,2	23	0	0	570'
15,7	16,1	23	1,96	0,588	480'
17,2	17,2	23	4,76	1,412	228'
15,7	15,8	23	6,54	1,960	44'
15,6	15,8	23	9,09	2,720	16'

Tabelle VI.
Kalibichromat $K_2Cr_2O_7$:

tC	tL	H_2O	% L	% C	ϑ
20,3	20,2	23	0	0	8'
20,8	21,8	23	0,16	0,05	8'
20,8	21,8	23	0,33	0,10	15'
19,5	19,8	23	0,66	0,196	29'
20,3	20,7	23	1,14	0,348	52'
19,3	18,0	23	1,63	0,490	105'
17,6	15,9	23	2,27	0,690	123'
19,3	19,5	23	3,20	0,990	193'

Tabelle VII.
Borsäure BH_3O_3 :

tC	tL	H_2O	% L	% C	ϑ
20,8	20,2	23	0	0	8'
18,3	20,2	23	0	0	8'
18,3	18,5	23	0,258	0,0774	76'
18,3	18,2	23	0,516	0,155	232'
19,5	19,5	23	1,03	0,309	290'
19,1	18,8	23	1,55	0,468	455'

Tabelle VIII.
Aluminiumchlorid und Aluminiumsulfat $AlCl_3 + Al_2(SO_4)_3$:

	tC	tL	H_2O	% L	% C	ϑ
	14°	15°	25,9	0	0	415'
$AlCl_3$	15°	16°	25,9	3,99	1,381	37'
$Al_2(SO_4)_3$. . .	15°	15°	25,9	3,99	1,381	70'
$AlCl_3 +$	16°	15°	25,9	1,99	0,695	35'
$Al_2(SO_4)_3$. . .				1,99	0,695	

Tabelle IX.

Kalidichromat und Borax $K_2Cr_2O_7 + Na_2B_4O_7$, 10 aq:

	tC	tL	H ₂ O	% L	% C	ϑ
	17°	18°	25,9	0	0	7—8'
$K_2Cr_2O_7$. . .	16°	18°	25,9	3,99	1,381	70'
$Na_2B_4O_7$. . .	16°	18°	25,9	3,99	1,381	540'
$K_2Cr_2O_7$. . .	18°	18°	25,9	1,99	0,695	240'
$Na_2B_4O_7$. . .				1,99	0,695	

Die Ursachen der Einwirkung der Zusätze.

Die Ursachen der Einwirkung dieser Zusätze, die zugleich Elektrolyte sind, auf die Hydratationsgeschwindigkeit lassen sich noch nicht vollständig erkennen; zweifellos wird die Koagulationsgeschwindigkeit der abgespaltenen Kolloidstoffe durch sie geändert, beschleunigt oder verzögert; dabei ist es charakteristisch, daß ein und derselbe Zusatz je nach seiner Konzentration beschleunigend und verzögernd wirken kann.

Auch Temperaturerhöhung beschleunigt sie, während Temperaturerniedrigung sie verzögert. Wahrscheinlich wird außerdem noch die Löslichkeit des hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyds durch diese Zusätze und dadurch die Abbindezeit beeinflusst.

Nach Candlot ist die verzögernde Wirkung einer verdünnten Lösung von Chlorcalcium auf die Bildung einer Doppelverbindung von der Zusammensetzung Al_2O_3 , 3 CaO, 2 CaCl₂, 16 H₂O zurückzuführen. Diese Auffassung ist unrichtig. Denn bei Anwendung von konzentrierten Lösungen von Calciumchlorid müßte sich die Candlotsche Doppelverbindung in noch reichlicherem Maße als bei Verwendung von verdünnten bilden und demnach die Bindungsgeschwindigkeit des Zements immer mehr verzögert werden; aber tatsächlich ist das Gegenteil der Fall.

Zusatz von Gips.

Die Wirkung des technisch allein von den erwähnten Stoffen verwendeten Gipses, und zwar des Dihydrates, CaSO₄, 2 H₂O, führen Büsing und Schuman¹⁾ auf mechanische und chemische Ursachen zurück.

Nach Ansicht dieser Autoren löst sich der Gips einerseits im Anmachewasser, um sich dann in äußerst feiner Verteilung auf die Zementpartikelchen niederzuschlagen; diese sind dann von einer dünnen, schützenden Hülle umgeben, wodurch die chemi-

¹⁾ Der Portlandzement und seine Anwendungen im Bauwesen.

sche Einwirkung des Wassers verzögert und infolgedessen auch das Abbinden verlangsamt wird.

Andererseits bildet sich durch Einwirkung des zugesetzten Gipses ein Tonerdekalksulfat; die Folge dieser beiden Vorgänge ist die Verzögerung des Abbindens.

Unter Berücksichtigung der Ursachen der anderen Zusätze ist die folgende Darstellung dieses Vorgangs die richtigere: der Gipszusatz wirkt verlangsamernd auf die Koagulation der ab- geschiedenen Kolloidstoffe; die Löslichkeit des Gipses wird ferner in der hydrolytisch abgespaltenen Kalklösung bedeutend ver- ringert; wie aber aus den obigen Versuchen hervorgeht, wirkt ein Zusatz im festen Aggregatzustande viel schwächer als im gelösten; andererseits wird die Löslichkeit des ab- geschiedenen Calciumhydroxyds bzw. Carbonates in der Gipslösung vergrößert, so daß dessen Abscheidung schwerer erfolgt. So kommt die Ver- längerung der Abbindezeit durch den Gipszusatz zustande. Mehr als 2% darf dieser nicht betragen, weil dann infolge der starken Volumenvermehrung bei der Bildung eines Tonerdekalksulfats Sprengung des im Erhärten begriffenen Zements eintritt.

Mit diesen Vorgängen im Zusammenhang steht das „Um- schlagen der Abbindezeit“, das gelegentlich beobachtet wird. Aus einem „Langsbinder“ wird ein „Raschbinder“ und umgekehrt; diese Umwandlung kann während der Lagerung, des Transports, an der Verwendungsstelle usw. sich vollziehen. Verschiedene Fälle solchen Verhaltens aus der Technik habe ich in meinem Buche angegeben¹⁾.

Umschlagen
der Abbinde-
zeit.

Als Ursachen sind folgende Momente zur Geltung gebracht worden: Selbstfeinung des Zements während der Lagerung, ein weiterer, selbständiger Zerfall der Zementpartikelchen, Art der Lagerung, chemische Änderung seiner Konstitution, Temperatur- erhöhung u. a.²⁾.

Die Änderungen in den Beträgen der Hydratationsgeschwindig- keit, „das Umschlagen“, läßt sich im wesentlichen auf folgende Vorgänge zurückführen: wie wir gesehen haben, kann durch Zusatz von ungefähr 1% Natroncarbonat die Hydratationszeit von 220' auf 5', oder durch Zusatz von 1% Aluminiumsulfat von 415' auf 35' reduziert werden.

Die Frage, ob sich so wirkende Substanzen von selbst im Zement bilden können, muß bejaht werden; es sind Alkali- und

¹⁾ Der Portlandzement vom chem.-phys. Standpunkt. Kap. VII.

²⁾ Protokoll der Verhandlungen des Vereins Deutscher Portlandzement- fabrikanten. 1901.

Aluminiumverbindungen, welche diese Änderungen herbeiführen, Oxyde, Sulfide, Sulfate, und die entweder im Rohmaterial schon enthalten sind oder sich während des Brennprozesses oder der Lagerung bilden; daß schon kleine Mengen genügen, um eine relativ große Wirkung hervorzurufen, beweisen die oben mitgeteilten Versuche. Die so gebildeten Stoffe beeinflussen dann die Bindungsgeschwindigkeit in dem oben beschriebenen Sinne. Für die Technik erwächst aber daraus die Verpflichtung, auf die häufige Bestimmung der Abbindezeit die geschärfte Aufmerksamkeit zu richten.

IV.

Der Eisenbeton.

Wie wir im zweiten Kapitel gesehen haben, bleibt Eisen unter alkalischer Flüssigkeit von nicht zu geringer Konzentration unoxydiert, und wie wir im dritten Kapitel konstatiert haben, spaltet der Zement beim Anrühren mit Wasser, während des Abbindens und in der ersten Erhärtungsperiode eine starke Basis, Calciumhydroxyd, hydrolytisch ab; und diese beiden Momente sind es, welche die Nichtoxydation des Eisens im Beton, die Rostsicherheit des Eisenbetons, bedingen.

Rostsicherheit des Eisenbetons

Die Natur scheint es bei dieser Tatsache geradezu auf einen Endzweck abgesehen zu haben, da das billigste, technisch brauchbarste und am leichtesten zugängliche Metall, das Eisen, von allen unedlen Metallen allein in dieser Kombination Verwendung finden kann. Diese Kombination wäre unmöglich, wenn auch nur die entfernteste Möglichkeit vorhanden wäre, daß sich Eisen im Beton oxydiert; denn die Eiseneinlagen würden dann statisch vollkommen unwirksam. Dieser Rostschutz ist dauernd, wie zahlreiche Beispiele beweisen; im Jahr 1903 wurde ein Stück eines Eisenbetonkanals, der im Jahr 1892 in St. Johann erbaut war, herausgenommen; das Eisen war vollständig rostfrei¹⁾.

In Grenoble wurde ein Stück der seit 1883 bestehenden Wasserleitung im Jahr 1901 herausgenommen; das Eisen war blank und seine Haftkraft eine große.

Um eine genügend starke alkalische Flüssigkeit beim An-

¹⁾ Beton und Eisen. S. 193. 1903.

rühren des Zements zu erhalten, darf die Menge des letzteren nicht zu gering sein; daher muß mindestens 1 Teil Zement mit 4 bis höchstens $4\frac{1}{2}$ Teilen Sand vermischet werden, damit vollkommene Rostsicherheit erwartet werden kann.

Damit ferner genügend Calciumhydroxyd aus dem Zement abgespalten werden kann, darf der Wasserzusatz nicht zu gering sein; er soll 12 bis 15 v. H. betragen. Dadurch werden zugleich hinreichend Kolloidstoffe aus dem Zement abgespalten, was sich durch die breiartige Beschaffenheit äußerlich kundgibt, und diese umschließen das Eisen mit großer Intensität.

Es muß vermieden werden, stark salzhaltiges Wasser oder Meerwasser zur Herstellung von Eisenbeton zu verwenden; es ist beobachtet worden, daß die Bildung großer knollenförmiger Mengen von Eisenoxyd stattfand¹⁾.

Salzhaltiges Wasser und Meerwasser enthalten Chloride, wie Chlornatrium, Sulfate, wie Magnesiumsulfat; wie aber im Kapitel II dargelegt worden ist, sind diese es gerade bzw. die Chlor- und Sulfationen, welche die Oxydation des Eisens beschleunigen; es kommt hinzu, daß einige dieser Salze infolge von Hydrolyse Wasserstoffionen abspalten, die erst recht die Oxydation beschleunigen; durch diese Vorgänge wird die Schutzwirkung der Alkalien bzw. Hydroxylionen vollständig paralysiert.

Ferner ist Wasser unbrauchbar, das organische, Humusstoffe enthält, ebenso solches, in dem Öle oder Fette vorhanden sind; es versteht sich von selbst, daß keine Säuren, auch nicht Kohlensäure, im Anmachewasser für Eisenbeton vorkommen dürfen; denn, wie wir im Kapitel II gesehen haben, beschleunigen diese bzw. ihre Wasserstoffionen die Oxydation in hohem Maße.

Für den erhärteten Eisenbeton genügt nach den bisherigen Erfahrungen eine Schicht aus $2\frac{1}{2}$ cm dickem Beton; wenn aber das Eisen hinreichend „alkalisch“ geschützt ist, so kann sie so dünn wie möglich sein.

Die Befürchtung, daß bei Verwendung kantiger Kiese freie Räume beim Eisen entstehen und Veranlassung zu seiner Oxydation geben würden, hat sich als unbegründet erwiesen; bei sorgfältiger Betonierung sollen keine solche Hohlräume entstehen.

Breuillé²⁾ hat als Ursache der Rostsicherheit folgendes angegeben: der Eisenbeton verbindet sich allmählich, selbst lange

Ursachen
der Rost-
sicherheit.

¹⁾ Büsing und Schumann l. c.

²⁾ Annales des ponts et chaussées. 1902.

Zeit nach dem Abbinden, chemisch mit dem Zement zu einem Eisensilicat, welches das Eisen als dünne, undurchdringliche Haut umschließt. Dabei soll eine Gewichtsverminderung des Eisens erkennbar sein. Dieses Eisensilicat soll ein in Wasser lösliches Salz sein.

Diese Ansicht ist total unrichtig; denn dann könnte, falls Eisenbeton unter Wasser liegt, dieses wasserlösliche Eisensilicat gelöst und ausgelaugt werden; das Wasser würde bis zum Eisen gelangen, und dann wären die Bedingungen zu seiner Oxydation gegeben.

Auch ist nach anderen Versuchen erwiesen¹⁾, daß kein einziges Eisenstück im Beton eine Gewichtsverminderung oder Raumveränderung erlitten hatte. Die wahren Ursachen der Nichtoxydation des Eisens im Beton, seiner Rostsicherheit, sind die oben angegebenen. Als Gegenbeweis kann dienen, daß Eisen in völlig erhärtetem Beton, auch schon in teilweise abgebundenem, von Rostangriffen heimgesucht wird; denn dann fehlt eben die alkalische Schutzwirkung.

Oxydation
der anderen
unedlen Me-
talle
im Beton.

Die anderen unedlen Metalle, Blei, Kupfer, Zinn, Zink, Aluminium, oxydieren sich in Verbindung mit Beton aus dem einfachen Grunde, weil sie von Alkalien angegriffen und zerstört werden. Auch das dem Eisen in chemischer Hinsicht sonst so nahestehende Aluminium wird aus diesem Grunde zerstört. Auch Legierungen, wie Messing und Bronze, bleiben im Beton nicht rostfrei; zur Bronzezeit wäre, selbst wenn damals der Zement bekannt gewesen wäre, eine Kombination Bronze-Beton schon aus diesem Grunde unmöglich gewesen.

Blei, Zink,
Zinn, Kup-
fer, Alumi-
nium
und Beton.

In Beziehung auf das Zink sind die bisherigen Versuche nicht ganz eindeutig ausgefallen; teils findet sich das Zink oxydiert, teils blank im Beton vor. So waren z. B. bei meinen Versuchen die Ränder eines Zinkstücks, das mit Zementmörtel etwa ein halbes Jahr in Berührung gewesen war, stark oxydiert, dagegen war es in der Mitte blank geblieben. Zink wird in alkalischen und sauren Lösungen oxydiert, nur in neutralen verbindet es sich nicht mit dem Sauerstoff; daher rühren wahrscheinlich die ungleichmäßigen Resultate.

Jedenfalls ist die Verbindung Beton-Zink nicht zu empfehlen. Auch verzinktes Eisen ist daher in Verbindung mit Beton der Oxydation zugänglich.

¹⁾ Zentralblatt f. Bauverwaltung. S. 183. 1904.

Kupfer oxydiert sich ebenfalls unter alkalischen Flüssigkeiten, daher auch in Verbindung mit Beton; dasselbe gilt vom Blei und Zinn¹⁾.

Die Untersuchungen der Kgl. Materialprüfungsanstalt Groß-Lichterfelde-West²⁾ kommen jetzt zu ähnlichen ungünstigen Resultaten, wenn sie auch in bezug auf das Kupfer etwas besser ausgefallen sind. Merkwürdigerweise ist aber bei diesen das wesentlichste Moment, der Einfluß des hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyds, vollständig außer acht gelassen worden. Und da Zink nach diesen Versuchen einen „ziemlich kräftigen“ Rostangriff erlitt, so ist der dort gemachte Vorschlag, ob das Festhaften des Zinks, das stärker als das des Eisens sein soll, am Zement sich nicht vielleicht technisch bei der Bewehrung des Betons ausnützen ließe, abzuweisen.

Aus dem Ausgeführten ergibt sich von selbst, daß diese unedlen Metalle in erhärtetem Beton nicht oxydiert werden, soweit sie nicht dem Einfluß der Luft bzw. des Sauerstoffs und der Feuchtigkeit unterliegen.

Von den Kombinationen Beton-Eisen-Kupfer, Beton-Eisen-Zink, Beton-Eisen-Blei, Beton-Eisen-Zinn wird sich nur die erstere gegen die Oxydation widerstandsfähig erweisen. Das Eisen selbst ist durch die alkalische Reaktion vor der Oxydation geschützt, und in Verbindung mit Kupfer schützt es auch dieses, wie schon J. von Liebig beobachtet hat, vor dem Angriffe des Sauerstoffs und der Luftfeuchtigkeit.

Früher hatte man sich gar nicht darüber gewundert, daß Eisen im Beton nicht oxydiert und zerstört wurde; man nahm es technischerseits als ganz selbstverständliche Tatsache hin, ohne nach den Ursachen zu fragen.

Aber von der Natur aus ist das Eisen allein vor der Oxydation geschützt; doch muß dafür Sorge getragen werden, daß die Eisenbetonierung sorgfältig ausgeführt wird. Das Eisen soll überall mit einer, wenn auch dünnen Schicht von Zement, der beim Anrühren mit Wasser die schützende alkalische Reaktion hervorruft (Zementmilch) umgeben sein. Ragt gelegentlich eine Eiseneinlage aus dem Beton hervor, so sind die Bedingungen zu seiner Oxydation gegeben; oxydiert sich aber Eisen im Beton, so ist dies sicher auf unfachgemäße Betonierung zurückzuführen.

¹⁾ P. Rohland, Stahl und Eisen, Nr. 5. 1908. Eine Bemerkung über den Eisenbeton.

²⁾ Versuche über das Verhalten von Kupfer, Zink und Blei gegenüber Zement, Beton usw. Berlin 1911.

Die Entrostung des Eisens im Eisenbeton.

Der Nichtoxydation des Eisens im Beton steht ein noch merkwürdigeres Phänomen gegenüber: seine Entrostung in diesem. Gelegentlich meiner Versuche, die bezweckten, aus Zement und Stahl bzw. Eisen Schutzschilde herzustellen, die vielleicht bei der Feldartillerie Verwendung finden könnten, wurde folgendes beobachtet: In eine Zementprobe war eine verrostete Eisenplatte eingelegt worden; nach ihrer Zertrümmerung zeigte es sich, daß sie fast vollständig entrostet war¹⁾.

Schon vorher war dieses Phänomen im großen Maßstabe angetroffen²⁾, und der erstere Fall bestätigt worden. Bei der Landesausstellung im Jahre 1905 in Nürnberg war von der Firma Dyckerhoff & Widmann ein Bogen aus Eisenbeton aufgeführt worden, bei dem angerostetes Eisen verwendet worden war. Nach Schluß der Ausstellung, ein Jahr nach der Errichtung, ergab sich beim Abbruch des Bogens, daß das vorher rostige Eisen vollkommen blank geworden war.

Mehrere Laboratoriumsversuche bestätigten diese beiden Ergebnisse; stark verrostete Eisenstäbe wurden in einen normalen, langsam bindenden Zement vom Zementwerk Lauffen a. N. in Württemberg gelegt; es zeigte sich schon nach 24 Stunden, nachdem das Abbinden und die erste Erhärtungszeit zu Ende waren, daß der Rost dünner geworden war und einzelne blanken Stellen vorhanden waren. Lange Zeit ist demnach nicht nötig, um das Eisen zu entrostet; darauf wurden dieselben Eisenstäbe in neuen Zement gebettet; nach einigen Tagen wurden sie wieder herausgeschlagen, und es zeigte sich, daß noch zahlreichere blanken Stellen sich gebildet hatten³⁾ und das unter der gelben Schicht von Eisenoxyd befindliche schwarze Eisenoxydoxydul zum Vorschein gekommen war. Nach mehrmaliger Wiederholung dieses Verfahrens konnte festgestellt werden, daß der obere Teil der Eisenstäbe, der sich außerhalb des Zements befand, mit Eisenoxyd überzogen war, während die Teile des Eisens, die sich im Zement befunden hatten, entrostet worden waren. An der Stelle, an der die Eisenstäbe in den Zement eintreten, in dieser Übergangszone war noch Rost vorhanden, da hier Luft bzw. Sauerstoff und die Feuchtigkeit noch Zutritt haben. Die Oxyddecke des Eisens besteht mitunter aus zwei Schichten, aus dem gelbroten, locker anhaftenden Eisenoxyd und aus dem schwarzen, fester

¹⁾ P. Rohland, Stahl und Eisen. Nr. 11, 45. 1909. Die Entrostung des Eisens im Eisenbeton.

²⁾ Nach einer freundlichen Mitteilung von Herrn Oberingenieur Dr. Edelmann vom Bayr. Gewerbemuseum in Nürnberg.

am Eisen sitzenden Oxydoxydul. Man kann infolgedessen auch unter verrosteten, in Beton eingelegten Eisenstäben noch längere Zeit solche finden, bei denen das gelbe Eisenoxyd verschwunden ist, aber die dünne Schicht des schwarzen Oxydoxyduls sich erhalten hat; nach einiger Zeit verschwindet auch diese.

Aus diesen Versuchen geht offenbar hervor, daß das Entrosten in der Zeit des Abbindens und der ersten Erhärtung stattfindet. Bei einem anderen Versuche wurden stark verrostete Eisenstäbe mit demselben Zement ohne Wechseln einige Zeit in Berührung gebracht; auch hier konnte das gleiche Ergebnis festgestellt werden.

Aus der Technik sind mir jetzt noch folgende Fälle mitgeteilt worden. Beim Neubau des Krankenhauses in Rastatt wurde die Beobachtung gemacht, daß beim Durchbrechen der Decken die in der Decke liegenden Rundeisen und sonstigen Eisenteile vollständig rostfrei zum Vorschein kamen. Beim Bau des städtischen Krankenhauses in Karlsruhe i. B., bei dem das System Müller-Marx zur Anwendung gelangte, wurde zum Teil sehr rostiges Bandeisener verwendet; dieses war ebenfalls, wie bei den Deckendurchbrüchen gefunden wurde, blank und rostfrei; an dem von Eisen losgelösten Beton war an der Berührungsstelle kaum eine Spur einer Rostfärbung zu entdecken.

Die Tatsache, daß Eisen im Eisenbeton entrostet wird, ist also nicht mehr in Zweifel zu ziehen; die Ursachen dieser Entrostung aufzusuchen, war die nächste Aufgabe.

Wie kommt diese Entrostung zustande? Diese Untersuchung gestaltete sich ziemlich schwierig und hing eng mit der Forschung nach der Konstitution des Zements zusammen. Wie wir im Kapitel III gesehen haben, wird beim Anrühren des Zements, beim Abbinden und in seiner ersten Erhärtungsperiode Calciumhydroxyd hydrolytisch abgespalten, ferner Kohlendioxyd aus der Luft adsorbiert. Der Verdacht, auf Eisenoxyd einwirken zu können, fiel zunächst auf das Calciumhydroxyd, indessen wirkt dieses allein nicht auf Eisenoxyd ein, wie Spezialversuche ergaben. Ferner kamen die Hydroxyde des Aluminiums, Siliciums und Eisens in Betracht, die im kolloiden Zustand abgespalten werden; auch diese wirken nicht auf Eisenoxyd ein. Kohlensäurehaltiges Wasser löst ferner zwar Eisenoxydul, aber nicht Eisenoxyd.

Ursachen
der
Entrostung.

Dagegen ergaben Versuche, daß saure Salze, saure schwefelsaure und saure kohlensaure Salze auf Eisenoxyd einwirken¹⁾,

¹⁾ P. Rohland, Die Löslichkeit des Eisenoxyds. Zeitschr. f. analytische Chemie. S. 629. 1909.

und damit war der Schlüssel zur Lösung des vorstehenden Problems gegeben.

Treten zwei der genannten Substanzen, Calciumhydroxyd und Kohlendioxyd, zusammen, so bildet sich saurer kohlensaurer Kalk, Calciumhydrocarbonat $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ oder das Ion HCO_3' in größerer Konzentration, das auf Eisenoxyd einwirkt. Diese Reaktion wird ganz wesentlich unterstützt und beschleunigt, wenn zugleich saures schwefelsaures Natron oder Calciumsulfat oder die Ionen HSO_4' oder SO_4'' zugegen sind.

Bringt man verrostete Eisenstäbe in Berührung mit Wasser, das bei Normaldruck mit Kohlendioxyd gesättigt ist, und dem so lange eine Lösung von Calciumhydroxyd hinzugesetzt worden ist, bis der entstehende Niederschlag von Calciumcarbonat langsam verschwindet, so wirken die bei größerer Konzentration gebildeten HCO_3' -Ionen auf das Eisenoxyd, wenn auch langsam, ein; jedenfalls ist nach 24 Stunden das Eisenion mit den üblichen Reagenzien nachweisbar; fügt man eine Spur primäres Alkalisulfat oder Calciumsulfat hinzu, so ist es schon nach 10 bis 12 Minuten zu konstatieren.

Der Vorgang im Zement spielt sich ganz ähnlich ab; das Kohlendioxyd der Luft wird, solange noch Feuchtigkeit im Zement ist, von dem hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyd aufgenommen; es entsteht saurer kohlensaurer Kalk oder das Ion HCO_3' in größerer Konzentration.

Durch den hierdurch entstehenden Verbrauch an Kohlendioxyd in der den Eisenbeton umgebenden Luftschicht wird das chemische Gleichgewicht zwischen Kalk und Kohlensäure gestört, und es wird Kohlensäure von neuem herangezogen. Ferner enthalten alle Zemente Gips bis etwa 2 v. H. und etwas Alkalisulfat. Es sind demnach auch die Substanzen im Zement vorhanden, welche die oben beschriebene Reaktion beschleunigen und unterstützen. Es ist sehr wahrscheinlich, daß saurer kohlensaurer Kalk, saures schwefelsaures Alkali und schwefelsaures Calcium, jedes für sich allein, eine schwächere Einwirkung auf das Eisenoxyd erzielen, als wenn sie sich in Gemeinschaft betätigen; für das Calciumsulfat ist es sicher. Es sei auch noch die Vermutung ausgesprochen, daß vielleicht eine Reduktion des Eisenoxyds zu Oxydul stattfindet, das dann von dem kohlensauren und schwefelsauren Salzen enthaltenden Wasser gelöst wird.

Es ist erklärlich, daß diese Reaktionen im Zement langsamer verlaufen als bei den geschilderten Versuchen; in diesen sind sogleich saurer kohlensaurer Kalk, saures schwefelsaures Alkali

oder Calciumsulfat oder die Ionen HCO_3' , HSO_4' bzw. SO_4'' vorhanden, während beim Eisenbeton die Einwirkung auf das Eisenoxyd erst erfolgen kann, nachdem sich aus dem Kohlendioxyd der Luft und dem hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyd der saure kohlensaure Kalk gebildet hat. Die Reaktion findet demnach zwischen einem gasförmigen Stoffe, dem Kohlendioxyd, einem gelösten, dem Calciumhydroxyd, und einem festen, dem Eisenoxyd, statt; und infolgedessen ist ihre Geschwindigkeit keine große.

Aber in diesen Vorgängen ist die Ursache des Verschwindens des Rostes im Eisenbeton zu suchen. Diese Entrostung kann nur so lange vor sich gehen, als der Zement abbindet und zu erhärten beginnt; ist er erst vollständig erhärtet, dann dürfte ein Verschwinden des Rostes unmöglich sein.

Die Entrostung findet an allen Teilen des Eisens statt, die mit dem Zement in engste Berührung gekommen sind; man sieht daraus, daß es auch für die Entrostung verrosteter Stellen am Eisen ungemein wichtig ist, daß sorgfältig betoniert wird und eine dünne Zementschicht überall das Eisen bedeckt.

Dünkelberg¹⁾ gibt eine andere Erklärung für die Entrostung an, die indessen unrichtig ist; er geht davon aus, daß Eisenrost Ammoniak aus der Luft kräftig absorbiert; nun soll dieses Gas mit dem abgespaltenen Calciumhydroxyd unter Mitwirkung des im porösen Beton enthaltenen Sauerstoffs in Reaktion treten und salpetrige und Salpetersäure bilden, die das Eisenoxyd auflösen.

Dagegen ist zu sagen²⁾, daß der Gehalt an Ammoniak in der Luft überhaupt sehr gering ist; aber auch ein Gemisch von Ammoniak und Luft oder Sauerstoff, auch verdichteter, verändert sich bei gewöhnlicher Temperatur überhaupt nicht; auch das Hinzutreten von Calciumhydroxyd vermag keine Oxydation des Ammoniaks zu salpetriger Säure oder Salpetersäure hervorzurufen; ein System, in dem die Moleküle NH_3 und O_2 , die Ionen Ca'' und OH' bzw. noch NH_4' vorhanden sind, bleibt bei gewöhnlicher Temperatur in Ruhe und unverändert. Auch in einer völlig ammoniakfreien Atmosphäre findet die Entrostung statt. Würde aber salpetrige und Salpetersäure im Überschuß gebildet, so wären die Bedingungen nicht nur nicht zur Entrostung, sondern vielmehr zur Oxydation des Eisens gegeben.

Auch die Behauptung von W. Michaëlis³⁾ trifft nicht das Richtige; er ist der Ansicht, daß die Entrostung auf die Bildung

¹⁾ Stahl und Eisen. S. 1318. 1909.

²⁾ P. Rohland, Stahl und Eisen. S. 1783. 1909.

³⁾ Der Erhärtungsprozess der kalkhaltigen hydraulischen Bindemittel.

von Tricalciumhydroferrit zurückzuführen ist, mit anderen Worten, daß Calciumhydroxyd und Eisenoxyd aufeinander einwirken.

Ich habe diesen Gedanken bei meiner Untersuchung auch verfolgt und tagelang Calciumhydroxyd, auch in Lösung, auf Eisenoxyd einwirken lassen; eine Umsetzung irgendwelcher Art konnte nicht beobachtet werden; auch ist sie vom rein chemischen Standpunkt aus sehr unwahrscheinlich.

Vielmehr sind die Ursachen der Entrostung die oben angegebenen.

Nach den bisherigen Untersuchungen ist also das blanke Eisen vor der Oxydation sicher, aber auch angerostetes Eisen wird bei sorgfältiger Betonierung entrostet; nach dieser Richtung ist mithin der Eisenbeton ganz vorzüglich geschützt.

Aber noch im „Handbuch für Eisenbetonbau“¹⁾ ist zu lesen: „Ob an den Eisenstäben haftender Rost schädlich wirkt, ist noch eine offene Frage, wahrscheinlich ist es aber besser, die Rostschicht vorher zu entfernen. Und im „Zentralblatt der Bauverwaltung“ 1903, S. 158, wird empfohlen, bei Monierplatten nur möglichst rostfreies Eisen zu verwenden. Trotzdem wird jetzt wohl allgemein ein angerostetes Eisen verwendet.

Adhäsions-
energie
(Haftfestig-
keit) des
Eisens am
Beton.

Wie wir im Kapitel II gesehen haben, wird durch die Kombination Eisen-Beton ein bedeutender Betrag der Dehnungsfähigkeit erreicht. Dieses Phänomen wird nach der Ansicht einzelner Forscher auf ein direktes Haften des erhärteten Betons am Eisen zurückgeführt, nach der anderer auf die Zusammenziehung des Betons beim Erhärten, wodurch das Eisen festgeklemmt wird; schließlich wird überhaupt bestritten²⁾, daß es eine Haftfestigkeit gibt, da der Zusammenhang zwischen beiden Materialien nur auf einem rein mechanischen Nebeneinanderwirken beruht.

Tatsächlich ist eine sehr starke Adhäsionsenergie zwischen Eisen und Beton vorhanden; sie beträgt 40—47 kg/qcm. Die verschiedenen Eisenbetonsysteme suchen diese Adhäsion durch mannigfache Einlagerung der Eisenstäbe und Drähte zur möglichst großen Geltung zu bringen. In Amerika wird „Thacher“-Eisen usw. verwendet, das äußerliche Unebenheiten aufweist, um diese Adhäsion zu vergrößern; indessen ist aus einem gleich

¹⁾ l. c. 1909. Bd. 4.

²⁾ Forscherarbeiten auf dem Gebiete des Eisenbetons Heft VI. Das Zusammenwirken von Beton und Eisen. 1906. Berlin.

zu erwähnenden Grunde diese Änderung unnötig; auch ist dabei zu berücksichtigen, daß R u n d e i s e n die am billigsten zu walzende Eiseneinlage ist.

Die Ursachen dieser Haftintensität waren bis jetzt unbekannt; die oben angegebenen Ansichten sind nur oberflächlicher Natur und lassen die eigentlichen Ursachen dieses merkwürdigen Phänomens nicht erkennen.

Ursachen
der Haft-
festigkeit.

Auch diese Adhäsionsenergie des Eisens im Beton ist in der nunmehr richtig erkannten Konstitution des Zements begründet. Wie wir im Kapitel III gesehen haben, spaltet der Zement beim Anrühren mit Wasser Stoffe im kolloiden Zustande ab, die dann koaguliert werden. In ersterem Zustand werden sie nun mit dem Eisen zusammengebracht, in diesem Stadium haben sie die Fähigkeit, es fest zu umschließen und fest an ihm zu haften.

Diese Kolloidstoffe, die als ein verzweigtes, engzelliges Maschengewebe aufzufassen sind, umklammern bei diesem Vorgang das Eisen mit großer Intensität; sie wirken wie irgendein anderer gelöster, kolloider Stoff, der in diesem Zustande einen festen Gegenstand umschließt und dann koaguliert wird¹⁾.

Diese Adhäsion ist demnach ganz bedeutend größer als zwischen Eisen und einem Gemenge von kristalloiden oder amorphen Stoffen, z. B. einem natürlichen Haustein.

Die aus dem Zement abgespaltenen Kolloidstoffe sind die Ursache der starken Haftfestigkeit des Eisens am Beton und weiterhin auch der Dehnungsfähigkeit des Eisenbetons. Auch die Formungsfähigkeit des Betons, die gerade beim Eisenbetonbau zur vollen Wirkung gebracht wird, hängt mit der Bildung dieser Kolloidstoffe insofern zusammen, als diesen gewisse plastische Eigenschaften zukommen.

Große Bedeutung für die Festigkeit des Eisenbetons und seiner sonstigen Eigenschaften hat die Auswahl der zugesetzten Sande und Kiese. Vor allen Dingen muß der Sand frei sein von organischen, erdartigen, humusartigen Bestandteilen, weil diese die Erhärtungsfähigkeit des Zements und die Festigkeit des Eisenbetons schwächen; es bilden sich dann Kalkhumussalze; ebenso dürfen keine kohleartigen Bestandteile darin enthalten sein. Auch Schwefelverbindungen dürfen nicht in den Sanden und Kiesen vorhanden sein; denn der Schwefel verbindet sich leicht mit dem Eisen zu Eisensulfid, das sich dann weiter zu Eisen-

Sande,
Kiese,
Schlacken.

¹⁾ P. Rohland, Der kolloide und kristalloide Zustand der Materie. F. Lehmanns Verlag m. b. H. Stuttgart 1910.

sulfat oxydiert und so eine Zerstörung des Eisenbetonkörpers herbeiführt. Auch schwefelhaltige Basalte dürfen keine Anwendung finden; in Nürnberg ist ihr Gebrauch zur Herstellung von Eisenbeton verboten worden.

Aus demselben Grunde ist in Preußen die Verwendung von Schlacken zur Herstellung von Eisenbeton verboten. Schlacken, insbesondere solche von Briketts, Braunkohle, aber auch von Steinkohlen enthalten Schwefel und Schwefelverbindungen, und diese veranlassen die oben beschriebene Reaktion. Vielfache Versuche haben dies erwiesen; es findet eine Gewichtsverminderung des Eisens im Schlackenbeton statt.

In Amerika wird allerdings Schlackenbeton angewendet; nach Ch. Norton kommen auch Rostungen vor; aber nach ihm ist der Schwefel nicht schuld daran, da der alkalisch reagierende Zement dem entgegenarbeite.

Diese Auffassung ist unrichtig. Das hydrolytisch abgespaltene Calciumhydroxyd kann zwar mit den Schwefelverbindungen der Schlacken reagieren und Calciumsulfid bilden; aber diese Schwefelverbindungen werden sich ebenso sicher mit dem Eisen verbinden und dieses zerstören. Das hydrolytisch abgespaltene Calciumhydroxyd vermag zwar das Eisen vor der Oxydation zu schützen, aber nicht vor dem Angriff der Schwefelverbindungen.

Müllver-
brennungs-
schlacken.

In Deutschland sind jetzt in größeren Städten die aus der Verbrennung des Mülls resultierenden Schlacken, die Müllverbrennungsschlacken, zur Herstellung von Beton und Eisenbeton verwendet worden. Ihre Zusammensetzung ist der Analyse nach die folgende¹⁾:

Tabelle X.

	Sommerschlacke 1908	Winterschlacke 1908/1909
CaO	9,88%	9,92%
SiO ₂	46,08%	45,74%
Fe ₂ O ₃	—	—
Mn ₂ O ₃	—	—
FeO	16,09%	15,75%
Al ₂ O ₃	18,84%	21,71%
MgO	2,67%	2,51%
Na ₂ O, K ₂ O	—	—
SO ₃	2,09%	1,54%
P ₂ O ₅	Spuren	—
Unbestimmter Rest.	3,95%	2,15%

¹⁾ Müllverbrennungsschlacke der Stadt Barmen.

Tabelle XI.

	Gesinterte Flug- asche 1908
CaO	10,25 %
SiO ₂	39,60 %
Mn ₂ O ₃	—
FeO	21,19 %
Al ₂ O ₃	24,26 %
MgO	2,91 %
K ₂ O, Na ₂ O	—
SO ₃	1,30 %
Unbestimmter Rest	0,49 %

Der Kalkgehalt ist in den Müllverbrennungsschlacken allerdings bedeutend niedriger als im Portlandzement und Eisen-Portlandzement; die betreffenden Zahlen sind: 9,88, 9,92, 10,25 % für Müllverbrennungsschlacken; 58—65,5, 54—60 % für Portlandzement und Eisen-Portlandzement. Es lag also die Befürchtung nahe, daß die schützende alkalische Reaktion zu schwach sein und das Eisen sich im Beton oxydieren würde. Indessen ist das nicht der Fall: in einer Mischung von 75 v. H. Müllverbrennungsschlacke und 25 v. H. Portlandzement blieb das Eisen nach meinen Versuchen völlig unoxydiert¹⁾.

Der Gehalt an Magnesia überschreitet in der Müllverbrennungsschlacke nicht die notwendige Grenze; die Zahlen hierfür sind: 2,67, 2,51, 2,91; mehr als 3 % soll sie nicht enthalten, da sonst Treiberscheinungen eintreten; die Magnesia hydratisiert sich unter Volumenvergrößerung und ruft dann Risse und Sprünge im Zement hervor.

An der Müllverbrennungsschlacke ist ferner besonders charakteristisch der hohe Gehalt an Eisenoxydul; sie enthält 16,09, 15,75, 21,19 % davon. Es war nun die Befürchtung ausgesprochen worden, daß die große Menge des in der Schlacke enthaltenen Eisenoxyduls schädlich wirken könnte; in der Tat war ja die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß das Eisenoxydul im Beton sich oxydieren und durch den Übergang in das Eisenoxyd andere schädigende Reaktionen hervorrufen würde. Indessen haben die bisherigen Beobachtungen diese Befürchtungen nicht bestätigt.

Der Schwefelgehalt in der Müllverbrennungsschlacke über-

¹⁾ P. Rohland, Über Müllverbrennungsschlacken. Tonindustriezeitung 33, 159. 1909.

schreitet den im normalen Portlandzement nicht; die Zahlen sind: 2,09, 1,54, 1,30 %.

Weil aber der Gehalt an Eisenoxydul in der Müllverbrennungsschlacke sehr groß ist, so dürfen keine Sande oder Kiese mit schwefelhaltigen Verbindungen mit ihr in Verbindung gebracht werden, z. B. schwefelhaltige Basalte, weil das sehr reaktionsfähige Eisenoxydul sich mit den Schwefelverbindungen zu Sulfid, das durch Oxydation in das leichtlösliche Sulfat übergeht, vereinigt.

Ferner kommt es wesentlich auf die Festigkeit des Sandes oder Kieses selbst an; ein Sand, der bröckelt und sich nach und nach in Staub auflöst, ist unbrauchbar; Sande, die Feldspate und Glimmer mit sich führen, sind leicht der Zermürbung ausgesetzt; unanwendbar sind Trachyte und Laven; für Eisenbeton, der feuerbeständig sein soll, ist Kalkstein zu vermeiden, da er in der Hitze in Calciumoxyd und Kohlendioxyd gespalten wird.

Besonders geeignetes Schottermaterial liefern die Urgesteine Granit, Porphyr, Grauwacke, Basalt; doch ist darauf zu achten, daß keine verwitterten Teile in ihnen enthalten sind.

Die Form der Sandsteinkörner ist ohne Bedeutung; ob die Sandkörner rund, oval oder eckig sind, ist gleichgültig, da der Betrag der Adhäsion zwischen Sand und Zement dadurch nicht erhöht wird. Auch diese Haftfestigkeit ist, wie die des Eisens am Beton, in der Abspaltung der kolloiden Stoffe aus dem Zement und deren Koagulation begründet.

Einige Bedeutung hat dagegen die Beschaffenheit der Oberfläche; hier ist es nicht gleich, ob diese glatt oder rau und uneben ist; es tritt verstärkte Adhäsion ein, wenn die Oberflächen der Sande und Kiese nicht glatt, sondern rau und uneben sind.

Indessen ist diesem Punkt überhaupt keine allzu große Bedeutung beizumessen; denn, wie erwähnt, beruht die gewaltige Adhäsion zwischen Zement und Kies auf der Bildung von kolloiden und koagulierten Stoffen; diese Haftfestigkeit betätigt sich aber in starkem Maße auch am glatten Eisen, wie an Kiesen und Sanden mit glatten Oberflächen; indessen ist natürlich ein Sand oder Kies mit rauher Oberfläche vorzuziehen.

Die Korngröße richtet sich nach der Verwendungsart des Betons; für den Eisenbeton können Stücke bis zur Walnußgröße, mit etwa 2 cm Durchmesser, verwendet werden; bei Anwendung allzu grober Kiese können Hohlräume entstehen, die zu Oxydationserscheinungen führen können, da an solchen Stellen die

rostschützende Wirkung des Zements fehlt. Sehr feiner Sand erfordert mehr Zement als gröberer.

Die Frage, ob Kiese oder Sande kleine Beimengungen von lehm- oder tonhaltigen Bestandteilen enthalten dürfen, ist verschieden beantwortet worden. Die meisten haben bisher die Ansicht vertreten, daß solche Beimengungen für den Erhärtungsvorgang schädlich seien. Indessen ist das unrichtig.

Ist einem Zementmörtel etwas Lehm oder Ton beigemischt, so schließt der hydrolytisch abgespaltene Kalk diese Silicate auf; es bilden sich wiederum kolloide Stoffe, die Hydroxyde des Siliciums und Aluminiums; in diesem Zustande umschließen sie die Sand- und Kieskörner sehr fest, und erstere werden dann wiederum durch den Kalk koaguliert. Durch diesen Vorgang wird eine starke Haftwirkung zwischen Kalk und Zement hervorgerufen; die Erhärtungsfähigkeit des Mörtels wird demnach nicht verringert, sondern im Gegenteil verstärkt.

Endlich sollen die Kiese und Sande frei von löslichen Salzen sein; denn diese verursachen später die Ausblühungen und Auswitterungen, welche die Oberfläche des Eisenbetons schädigen; diese Auswitterungen bestehen meistens aus Sulfaten der Alkalien und des Magnesiums, seltener aus Soda oder Kochsalz.

Kiese und Sande von großer Festigkeit, die frei sein müssen von organischen, humusartigen Bestandteilen, lehm- oder tonhaltige Beimischungen in geringer Menge enthalten können, deren Oberflächen möglichst rauh und uneben sein sollen, und die keine wasserlöslichen Salze enthalten dürfen, — solche dürften allen Anforderungen, die an sie in chemischer, physikalischer und bautechnischer Hinsicht gestellt werden, entsprechen.

Bei hoher Temperatur muß mehr Wasser zur Herstellung von Eisenbetonkörpern verwendet werden, um die verdunstende Menge zu ersetzen; während des Abbindens müssen diese aus demselben Grunde feucht gehalten werden; denn durch hinreichend großen Wasserzusatz werden erst die zum Abbinden und Erhärten nötigen kolloiden Stoffe in größerer Menge abgespalten. Die Erfahrung hat gezeigt, daß noch bei niederen Temperaturen, wie bei -2° , betoniert werden kann. Doch darf kein zusammengefrorener Sand verwendet werden. Die Betonierung bei niederer Temperatur bedarf aber großer Vorsicht; denn die Koagulationsgeschwindigkeit der abgespaltenen kolloiden Stoffe wird verringert und damit die Erhärtungsfähigkeit des Zementmörtels vermindert.

Betonie-
rungsregeln.

Mit dem Ausschalen, namentlich bei Eisenbetonbrücken, muß daher möglichst lange gewartet werden. Salz z. B. Sodazusatz zum Zement, um sein Abbinden zu beschleunigen, ist nicht zu empfehlen, da hierdurch die Oxydation des Eisens hervorgerufen werden kann, außerdem Auswitterungen zu befürchten sind.

Druckfestig-
keit des
Eisenbetons.

Die mit solchen Materialien und solchen Betonierungsregeln hergestellten Eisenbetonwürfel weisen dann folgende Beträge an Druckfestigkeit auf¹⁾:

Armierter Beton ohne Einbeziehung des Eisens.
Druckfestigkeit von Eisenbetonwürfeln.

Abmessungen	Nach 6 Wochen	Nach 3 Monaten
17 cm hoch, Armatur 4×8 mm	109 kg/qcm	149 kg/qcm
34 cm hoch, Armatur 4×8 mm	110 kg/qcm	159 kg/qcm
17 cm hoch, Armatur 4×16 mm	117 kg/qcm	190 kg/qcm
34 cm hoch, Armatur 4×16 mm	112 kg/qcm	159 kg/qcm

Armierter Beton mit Einbeziehung des Eisens.
Druckfestigkeit von Eisenbetonwürfeln.

Abmessungen	Nach 6 Wochen	Nach 3 Monaten
17 cm hoch, Armatur 4×4 mm	125 kg/qcm	188 kg/qcm

V.

Das Verhalten des Eisenbetons gegen Flüssigkeiten
aller Art, Meerwasser, Gase usw.

Auf Grund der so gewonnenen Erkenntnisse über die Konstitution des Zements und die Eigenschaften des Eisens läßt sich nun auch das Verhalten des Eisenbetons gegen Flüssigkeiten aller Art, Lösungen von Säuren, Laugen, Salzen, städtische Ab- und Fabrikwässer, Gärungsflüssigkeiten, Meerwasser, gegen Gase,

¹⁾ Handbuch f. d. Eisenbetonbau. Bd. I.

Humusstoffe, hohe Temperatur und den elektrischen Strom ableiten und erkennen. Technisch sehr wichtige Fragen werden davon berührt.

Es sind folgende Flüssigkeiten und Lösungen, die den Eisenbeton zerstören:

1. Säuren und saure Salze,
2. kohlen säurehaltiges Wasser,
3. Magnesium- und Schwefelverbindungen.

Alle Flüssigkeiten, die sauer reagieren, greifen den Eisenbeton an; es ist dies beinahe der einzige Nachteil dieses sonst so vortrefflichen Baumaterials, und zwar wirken diejenigen Säuren, wie Salzsäure, Salpetersäure usw., die mit dem Kalk des erhärteten Zements leichtlösliche Kalksalze bilden, am stärksten auf ihn ein, weniger intensiv Säuren wie schweflige Säure, Schwefelsäure, Flußsäure, die mit dem Kalk schwerlösliche Salze zu bilden vermögen; dadurch wird eine schützende Decke über die Oberfläche des Zements hergestellt.

Säuren und saure Salze.

Alle diese Säuren, da sie stärker dissoziiert sind als die Kohlensäure des Calciumcarbonats, lösen das auf der Oberfläche des Eisenbetons und auch in den darunter befindlichen Schichten gebildete Calciumcarbonat auf unter Kohlensäureentwicklung und zerstören ihn dadurch. Über die „Säurebeständigkeit“ des Zements geben folgende Versuche¹⁾ präzise Auskunft.

Die Prüfungskörper bestanden aus 1 Teil Zement und 2 Teilen Sand aus Freienwalde a. d. Oder; sie wurden 8 Tage alt dem Einfluß von Salzsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure und Essigsäure ausgesetzt.

Tabelle XII.

	Gew.d.Probe- körper vorher	Nachher	Verlust	%
5 % HCl	802	709	93	11,6
5 % HNO ₃	808	728	80	9,5
5 % H ₂ SO ₄	811	752	59	7,3
5 % C ₂ H ₄ O ₂	814	802	12	1,5
10 % C ₂ H ₄ O ₂	814	787	27	3,3

Nach 28 Tagen betrug der Gewichtsverlust in Prozenten bei Einwirkung von HCl 7,5 %, HNO₃ 4,9 %, H₂SO₄ 4,4 %, C₂H₄O₂ 2,2 bzw. 2,4 %.

¹⁾ Untersuchungen der Materialprüfungsanstalt Groß-Lichterfelde-West.

Man sieht deutlich, daß diejenigen stark dissoziierten Säuren, die leicht lösliche Salze mit dem Kalk des Zements bilden, die Probekörper am meisten zersetzt haben; es sind dies Salzsäure und Salpetersäure, während Schwefelsäure, obgleich sie annähernd den gleichen Dissoziationsgrad hat, weniger stark einwirkt: es bildet sich der schwerlösliche Gips. Daß mit der größeren Konzentration der Säure bzw. der Wasserstoffionen die zerstörende Wirkung wächst, ist aus den Versuchen mit der Essigsäure zu erkennen.

Organische Säuren machen keinen besonders ungünstigen Einfluß auf den Eisenbeton geltend, wenigstens nicht die hochmolekularen, da diese sehr schwach dissoziierte Säuren sind; nur die Anfangsglieder der Fettsäuren, Ameisensäure, Essigsäure, wirken als stärker dissoziierte Säuren intensiver auf den Eisenbeton in der oben geschilderten Weise ein.

Es ist auch beobachtet worden, daß saure Flüssigkeiten bei Gegenwart von organischen Stoffen Eisenbeton nicht angegriffen haben; vermutlich haben sie sich an seiner Oberfläche festgesetzt und so eine Schutzdecke gebildet.

Es ist auch auf Salzlösungen die Aufmerksamkeit zu richten; neutrale, wie Chlorkalium, und alkalische, wie Soda, Pottasche, sind nicht imstande, auf den Eisenbeton eine Wirkung auszuüben; wohl aber Salzlösungen, die hydrolysiert werden und sauer reagieren, wie Salmiak und Glaubersalz.

In der schwäbischen Stadt Gmünd sind die Eisenbetonrohre für die Kanalisation durch die Abwässer auf diese Weise zerstört worden, und zwar hatte das folgende Ursache. Die Stadt Gmünd besitzt eine zahlreiche und lebhaft Metallindustrie in vielen kleinen häuslichen Betrieben, deren saure Abwässer in die Kanalisationsröhren geleitet wurden. Hier müssen entweder geeignete Schutzanstriche für die Eisenbetonrohre oder Tonröhren und Ziegelmauerwerk zur Verwendung gelangen. In Gmünd sind die Eisenbetonrohre durch Tonröhren ersetzt worden.

In Baden-Baden wurde ebenfalls beobachtet, daß Eisenbetonrohre beschädigt waren; dort soll es durch den mitgeführten Sand geschehen sein. Doch ist wahrscheinlich dieser Vorgang so zu erklären, daß das durch die Röhren geleitete Wasser etwas kohlenstoffhaltig ist, Kohlensäure aber leicht das auf ihrer Oberfläche gebildete Calciumcarbonat auflöst; dann sind Sand- und Kieskörner durch das rasch und stark strömende Wasser herausgerissen worden, die dann, mit fortgeführt, die Oberflächen der Röhren noch weiter zerstört haben.

Jedenfalls ist solchen Vorgängen große Aufmerksamkeit zu schenken.

Im Gegensatz zu den Säuren sind alle verdünnten Laugen auf den erhärteten Eisenbeton ohne Einfluß, auf den erhärtenden von günstiger Wirkung; ebenso Lösungen von Salzen, die hydrolysiert werden und alkalisch reagieren, wie Soda, Pottasche; wirkungslos sind ferner fast alle neutralen Salze; nur dem Kochsalz gegenüber ist einiges Mißtrauen gerechtfertigt. Laugen.

Es soll allerdings sich ereignet haben¹⁾, daß die Böden aus Eisenbeton hergestellter Behälter für Laugen verstärkt werden mußten, da diese den ersteren angriffen. In diesem Falle wird es sich entweder um ganz konzentrierte Laugen gehandelt haben, oder es liegt doch eine andere Ursache vor.

Sehr stark kochsalzhaltige Wasser können den Eisenbeton insofern schädigen, als sie den zur Verlängerung der Abbindezeit zugesetzten Gips aus dem Zement herauslösen können. Doch wird aus Aussee berichtet, daß bei der k. k. Salinenverwaltung Zuleitungsröhren aus Eisenbeton für gesättigte Salzsoole sich gut bewährt haben.

Gegen Süßwasser verhält sich Eisenbeton vollständig widerstandsfähig; im Grund- und Brunnenwasser und im gewöhnlichen Quellwasser ist die Menge der darin gelösten Salze, die eine schädigende Wirkung auf den Eisenbeton ausüben könnten, zu gering; eine Ausnahme bilden nur die Thermalwässer.

Wässer, die freie Kohlensäure absorbiert enthalten, zerstören den Eisenbeton; sie befinden sich also im Gegensatz zu Wässern, die kohlensaure Salze enthalten. Denn kohlensäurehaltiges Wasser löst zunächst das auf der Oberfläche des Eisenbetons gebildete Calciumcarbonat auf. Diese Wirkung verstärkt sich noch, wenn solche Wässer eine höhere Temperatur haben. Thermalwasser.

Schwefelhaltige Thermalwässer dürfen ebenfalls nicht durch Eisenbetonrohre und Bassins geleitet werden; die Schwefelverbindungen verbinden sich mit dem im Zement enthaltenen Eisen und den Eiseneinlagen zu Eisensulfid, das durch Oxydation in wasserlösliches Eisensulfat übergeführt wird. Die bosnisch-herzegowinische Salinenverwaltung in Tuzla will allerdings mit Behältern aus Ziegeln und Zementmörteln, die mit Portlandzement verputzt waren, gute Erfahrungen gemacht haben, trotzdem sie fortwährend in Berührung mit schwefelwasserstoffhaltiger Soole stehen.

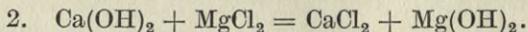
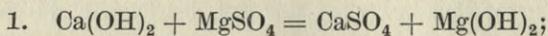
¹⁾ Handbuch f. Eisenbetonbau. Bd. V. 2. Auflage.

Jedenfalls kann die Verwendung von Eisenbetonrohren und Bassins für Thermalquellen keineswegs ohne weiteres, sondern nur nach genauer analytischer Untersuchung der letzteren gestattet werden.

Meerwasser. Wenn Eisenbetonbauten mit Meerwasser in Berührung kommen, so ist dabei folgendes zu beachten. Die mittlere Zusammensetzung des Meerwassers ist die folgende: 100 000 Teile Meerwasser enthalten 2,7 Teile Kochsalz, 0,07 Teile Chlorcalcium, 0,36 Teile Magnesiumchlorid, 0,002 Teile Magnesiumbromid, 0,23 Teile Magnesiumsulfat, 0,14 Teile Gips, 0,003 Teile Kalkstein im wesentlichen. Die Gesamtmenge des Seesalzes beträgt in der Nordsee etwa 0,32 v. H., in der Ostsee ungefähr halb so viel.

Die Einwirkung des Meerwassers auf den Beton ist in vielen Fällen festgestellt; derartige Beobachtungen wurden schon an einer der ersten Bauten, an den von der französischen Regierung im Jahre 1840 in Algier errichteten Seebauten gemacht; als hydraulisches Bindemittel dienten Puzzolane, die mit Kalk vermischt waren.

Von den Salzen des Meerwassers sind es besonders die Magnesiumsalze, die den Eisenbeton zerstören; die Reaktion, auf der die Zerstörung beruht, besteht darin, daß die Magnesiumsalze und der hydrolytisch abgespaltene Kalk miteinander reagieren, so daß Magnesiumhydroxyd und Calciumsulfat bzw. Chlorcalcium gebildet werden, die unter Volumenvermehrung und Wasserbindung auskristallisieren, wodurch eine Sprengung des Mörtels hervorgerufen wird, wie dies in den beiden folgenden Gleichungen zum Ausdruck kommt:



So hat General Schuliatschenko¹⁾ auf Grund von Analysen von der Oberfläche und vom Inneren von Puzzolanmörtel gezeigt, daß die äußeren, beschädigten Teile fünfmal so viel Magnesia enthielten als die inneren, unbeschädigten. Der Gehalt an Magnesia war an den beschädigten Teilen von 1,88 auf 10,40 angewachsen, während er für den Kalk von 31,33 auf 19,33 gesunken war; es hatte also eine Umsetzung in der oben beschriebenen Weise stattgefunden.

Es folgt aber daraus, daß Eisenbeton, solange die Abspaltung des Kalkes noch andauert, nicht mit dem Meerwasser in Berührung gebracht werden darf; ich habe daher schon früher vor-

¹⁾ Tonindustrietzg. 23. Nr. 64. 1899.

geschlagen¹⁾, für Bauten im Seewasser bestimmte Betonblöcke, in nicht zu magerer Mischung, erst in Süßwasser erhärten zu lassen, solange die Kalkabspaltung anhält, und erst nach beträchtlicher Abnahme dieser Abspaltung zu Bauten oder Gegenständen, die mit dem Meerwasser in Berührung kommen, zu verwenden.

Den Beweis für die Richtigkeit dieses Vorschlags haben die Versuche von M. Möller bei Husum erbracht: es ergab sich, daß, während der frisch hergestellte Beton sich im Bau nicht bewährte und die oberen, nach der Zerstörung freigelegten Eiseneinlagen völlig verrosteten, Platten, die beim Einbauen etwa 40 Tage alt, also schon gut erhärtet waren, sich auch dem Meerwasser gegenüber gut verhielten²⁾.

Wie wir schon im Kapitel III gesehen haben, läßt sich der Nachweis, ob die hydrolytische Kalkabspaltung noch andauert, leicht mit alkoholischer Phenolphthaläinlösung, die da, wo Hydroxyde bzw. Hydroxylionen vorhanden sind, eine intensive Rotfärbung hervorruft, oder mit roter Lackmustinktur, ferner mit Ammoniumsalzen erbringen. Die Bildung von Ammoniak findet nur so lange statt, als Calciumhydroxyd abgespalten wird. Auch Quecksilbersalze kann man verwenden; das abgespaltene Calciumhydroxyd reagiert mit den Magnesiumsalzen, und das gebildete Magnesiumhydroxyd gibt mit den Quecksilbersalzen einen gefärbten Niederschlag.

Nach Candlot³⁾ beruht eine weitere Zerstörungsreaktion des Meerwassers darauf, daß durch Einwirkung von dem in ihm enthaltenen Gips auf den Zement eine Doppelverbindung, ein Ton-erde-kalksulfat gebildet wird, das unter Aufnahme von viel Wasser und starker Volumenvermehrung auskrystallisiert; auch dieser Vorgang würde eine Zerklüftung und Zerstörung des Eisenbetons zur Folge haben.

Auch der vollständig erhärtete Eisenbeton ist gegenüber dem Meerwasser nicht wasserdicht; 20 mm starke Probewürfel, welche drei Jahr lang unter Wasser gelegen hatten, wurden 6 Monate hindurch in eine 10 prozentige Lösung von Natriumsulfid gelegt; die meisten von ihnen waren nach mehreren Monaten bis auf 10 mm von dieser Lösung durchtränkt.

Die mechanische Wirkung der Wellen an sich ist bei unbeschädigten Betonblöcken von geringem Einfluß; Blöcke, die von den Wogen kräftig umspült werden, verlieren die scharfen

Mechanische
Wirkung
der Wellen.

¹⁾ P. Rohland, Tonindustrie-Ztg. 29. Nr. 106. 1905.

²⁾ Handbuch f. Eisenbetonbau. Bd. V. 2. Auflage.

³⁾ Mémoire ayant trait aux propriétés des ciments. Paris 1890.

Kanten; doch wird die mechanische Wirkung an schon infolge von chemischer Einwirkung des Meerwassers beschädigten Blöcken das Zerstörungswerk unterstützen.

In der Nordsee kommt noch der zerstörende Faktor des Wechsels von Ebbe und Flut hinzu; Beton nämlich unter Wasser vergrößert sein Volumen, während er an der Luft, und namentlich an trocken, es vermindert¹⁾. Durch den Flutwechsel, der den Beton abwechselnd mit Wasser und trocken Luft in Berührung bringt, wird eine fortwährende, wenn auch geringe Volumenänderung hervorgerufen. Wenn behauptet wird, daß Blöcke, die tief im Wasser gelegen haben, keine Zerstörungen gezeigt haben, so liegt das daran, daß hier eine kräftige mechanische Wirkung der Wellen fehlt, und daß diese Blöcke jedenfalls in vollständig erhärtetem Zustand ins Meerwasser gesenkt wurden.

Um einwandfreie Resultate, insbesondere über die jahrelang andauernde Einwirkung des Meerwassers auf Betonblöcke zu erhalten, werden an verschiedenen Stellen Prüfungen vorgenommen, z. B. auf der Insel Sylt vom preußischen Arbeitsministerium (hier zeigte es sich, daß die Blöcke, die genügend dicht gemacht worden waren, fünf Jahre lang sich widerstandsfähig erwiesen hatten), ferner bei Thyborön in Schweden, wo besonders der Einfluß der mechanischen Einwirkung des Frostes und des Klimas auf die Betonblöcke geprüft wird; ferner an den russischen Häfen des Schwarzen und Kaspischen Meeres.

Eisenbeton-
pfähle.

Aus dem Ausgeführten ergibt sich auch die Antwort auf die Frage, ob für eine Kaianlage Eisenbetonpfähle zur Anwendung gelangen können. Wenn diese Eisenbetonpfähle erst im vollständig erhärteten Zustand mit dem Seewasser in Berührung gebracht werden, nachdem die hydrolytische Abspaltung des Kalkes aufgehört oder wenigstens stark nachgelassen hat, so ist nicht zu befürchten, daß eine Einwirkung auf den Eisenbeton stattfindet. Dann kann auch der Wechsel zwischen Hoch- und Niederwasser, mit dem die oben erwähnte Volumenänderung des Zements verbunden ist, keine irgendwie nennenswerte Schädigung hervorrufen. Das Eisen im Beton ist durch die alkalische Reaktion des Zements geschützt; doch darf es niemals in direkte Berührung mit dem Meerwasser gebracht werden, da, wie wir im Kapitel II gesehen haben, Chloride und Sulfate bzw. Chlor- und Sulfationen die Oxydation stark beschleunigen; es müssen dann Rostschutzmittel in Aktion treten.

¹⁾ Untersuchungen der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart.

Man erkannte bald, daß der Eisenbeton ein vorzügliches Baumaterial in bautechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht für Flüssigkeitsbehälter sein müsse. Zuckerfabriken, Gerbereien, Papierfabriken, Färbereien, Bleichereien, Seifensiedereien, Brauereien, Brennereien haben ihn in ihren Dienst gestellt. Der größte Flüssigkeitsbehälter aus Eisenbeton, von einem Kubikinhalte von 95 000 cbm, ist in St. Louis erbaut worden. Doch muß die chemische Natur der fraglichen Flüssigkeit dabei berücksichtigt werden.

Öle, Fette,
Teere.

Teere, Öle, fetthaltige Flüssigkeiten wirken im allgemeinen nicht auf den Eisenbeton ein. Zwei Momente sind dabei beachtenswert. Erstens die chemische Beschaffenheit dieser Flüssigkeiten. Bei solchen, die im Laufe der Zeit infolge von Oxydation sauer werden können, ist eine Einwirkung auf den Eisenbeton unvermeidbar. Hierher gehören animalische und vegetabilische Öle, wie Knochenöl, Tran, Rindertalg, Kunstfette, Olivenöl, Rüböl, während mineralische Öle, die wesentlich aus Kohlenwasserstoffen bestehen, wirkungslos sind. Es könnte sich höchstens Naphthasäure bilden, die den Eisenbeton schädigen könnte. Wiederum solche Öle, die von vornherein Fettsäuren enthalten, dürfen keinesfalls mit Eisenbeton in länger dauernde Berührung kommen.

Hieraus erledigt sich auch die zurzeit sehr aktuelle Frage, ob bei dem Bau großer Tanks für Heizöl, Treiböl, Petroleum Eisenbeton für die Wandungen anwendbar ist. Eisenbetonbehälter für die letztere Flüssigkeit haben sich gut bewährt.

Der zweite Punkt, der bisher hierbei zu wenig beachtet worden ist, ist der folgende. Wie wir im Kapitel III gesehen haben, spaltet der Zement auch noch beim Abbinden und in der ersten Erhärtungsperiode Calciumhydroxyd hydrolytisch ab. Kommt nun in diesem Stadium Fett mit ihm in Berührung, so findet eine Verseifung desselben statt, es bilden sich fettsaure Kalksalze; dadurch wird der Eisenbeton zerstört. Es ist also auch hier erforderlich, erst dann den Eisenbeton mit solchen Flüssigkeiten in Berührung zu bringen, wenn die Kalkabspaltung beendet ist.

Unbedingt notwendig ist bei der Herstellung von Eisenbetonbehältern große Dichtigkeit des Betons, nicht zu großer Wassereinsatz und gründliches Stampfen. Zusätze zum Eisenbeton sind prinzipiell nicht zu empfehlen, da solche die Erhärtungsfähigkeit des Zements herabsetzen.

C. Carpentaria hat zwar einen Ölzusatz von 2% zum Anmache-

wasser empfohlen¹⁾; abgesehen davon, daß dieser das Abbinden verzögert, was aber ohne Nachteil sein würde, war aber die Festigkeit nach 28 Tagen geringer als bei normalem Beton.

Ein passender Schutzanstrich dürfte, wenn etwaige saure Bestandteile in den Ölen sind, einen Angriff auf den Zement unmöglich machen.

Fabrik- und
städtische
Abwässer.

Was die Fabrikwässer anbetrifft, so können solche von alkalischer und neutraler Reaktion unbedenklich durch Eisenbetonröhren und -behälter geführt werden, besonders solche, die Stoffe im Kolloidzustand noch enthalten. Als solche sind zu bezeichnen z. B. die Fabrikwässer, die aus der Industrie der Kohlehydrate, der Stärkefabriken usw. stammen; ferner die der Gerbereien, Leimsiedereien, Färbereien, Bleichereien, der Fett- und Ölfabriken, der Zuckerfabriken, der Papierfabriken, der Wollwäschereien, der Tuch-, Baumwoll- und Seidenfabriken; auch die Abwässer der Brauereien dürften keinen Schaden anrichten, die viel Stoffe im kolloiden Zustand, wie Hopfenabfälle und Zersetzungsprodukte des Eiweißes, enthalten; nur müßte vorher noch die Acidität, herrührend von der Gerb- und Lupulinsäure, im wesentlichen bestimmt werden. Ähnlich verhalten sich die Abwässer der Brennereien.

Vorsichtsmaßregeln und Schutzmittel müssen dagegen angewendet werden, wenn die Abwässer z. B. von Messinggießereien, Verzinnereien, Leblancsoda- und Solvaysodafabriken, Salinen, Steinkohlengruben, Schwefelsäure- und Salzsäurefabriken, Pottaschefabriken, Fabriken der künstlichen Düngemittel durch Eisenbetonrohre geleitet werden sollen.

Es ist hier die Frage zu beantworten, wie hoch der Grad der Acidität in den Abwässern ist, welche Säuren in ihnen enthalten sind, und welches von den später zu besprechenden Schutzmitteln für den vorliegenden Fall am besten benutzt werden kann.

C. Erdmenger²⁾ hat früher die Ansicht ausgesprochen, daß Flüssigkeiten, die nicht mehr als 0,25 v. H. freie Säure enthalten, für Zementmauerwerk unbedenklich sind, und daß saure Flüssigkeiten ohne Schaden sind, wenn sie 1 v. H. Schwefelsäure enthalten, aus den oben angeführten Gründen, während Salzsäure und Salpetersäure bereits in dieser Konzentration von verderblicher Wirkung sind.

Nach Dyckerhoff³⁾ benutzt eine Zuckerfabrik zementierte

¹⁾ Eng. News. S. 16. 1907.

²⁾ G. Feichtinger, Chem. Technologie der Mörtelmaterialien.

³⁾ ibidem.

Bassins zum Aufbewahren von Salzsäuregemischen von 5 bis 10 v. H. und eine andere Fabrik Behälter aus Ziegelsteinen mit Zementmörtel und Zementputz für Schwefelsäure, Alaun und Superphosphate.

Vor einigen Jahren ist sogar in Beuthen von der oberschlesischen Zementdielenfabrik eine öffentliche Bedürfnisanstalt aus Zementdielen und Brettern hergestellt worden.

Doch sind das wohl Ausnahmefälle; in der Praxis hält man sich an die Regel, daß die Wässer, die mit Eisenbetonröhren in Berührung kommen sollen, höchstens 0,1 v. H.-Säuren oder Kochsalz enthalten dürfen.

Es erübrigt sich, noch zu bemerken, daß die Temperatur der Fabrik- und Abwässer die gewöhnliche sein muß, wenn der Gehalt an Säuren der erwähnten Zahl entspricht; bei höherer Temperatur, bei stärker erwärmten oder heißen Wässern findet eine Einwirkung auf den Eisenbeton statt.

Für die Legung von Eisenbetonröhren und Behältern ist noch folgender Punkt von Wichtigkeit, und dieser ist öfter übersehen worden: derselben sollte stets eine Untersuchung des Bodens, dem sie einverleibt werden sollen, nach geologischer und chemischer Richtung vorausgehen. Nicht alle Böden eignen sich hierzu; erstens kann das Grundwasser, falls es von Aborten stammende salpetersaure Salze enthält, den im Zement vorhandenen Gips herauslösen und so den Eisenbeton schädigen, und ferner können die im Boden vorhandenen Schwefelverbindungen auf dem oben angegebenen Wege mit dem Zement reagieren und ihn zerstören.

So ist in Osnabrück ein aus Stampfbeton hergestellter Sammelkanal durch die Einwirkung saurer Grundwässer zerstört worden; diese stammten aus einem Moorboden, der schwefelkieshaltig war; durch die oxydierende Wirkung von Luft und Feuchtigkeit bildete sich Schwefelsäure, die den Zement schädigte¹⁾.

In einem anderen Falle wurde eine Eisenbetonrohrleitung zu Kanalisationszwecken durch Abwässer zerstört, die von einer Dampfkesselanlage aus in den Boden sickerten, und die zur Reinigung des Kesselspeisewassers benutzte Chemikalien mit sich führten²⁾.

In solchen Fällen ist man leicht geneigt, dem Material einen, und zwar unberechtigten Vorwurf zu machen; man muß eben die Schwächen, die auch das vorzüglichste Material hat, kennen.

¹⁾ Mitteilungen des Bayr. Gewerbemuseums. Nürnberg 1907.

²⁾ Mitteilungen des Bayr. Gewerbemuseums. Nürnberg 1907.

Wenn saure Grundwässer in Frage kommen, müssen Rohre und Behälter aus anderem Material als Eisenbeton gewählt werden oder Zementschutzmittel zur Anwendung gelangen.

Städtische
Abwässer.

Die Erfahrung hat ferner gelehrt, daß städtische Abwässer unbedenklich durch Eisenbetonrohre und -bassins geleitet werden können; denn in ihnen ist der größte Teil der faulfähigen Stoffe in kolloider Form enthalten, wie Shanhnessy und Kinnaslay¹⁾ gezeigt haben; und diese kolloiden Stoffe lagern sich an den Wandungen der Röhren (sog. Sichelhaut) ab und schützen so den Eisenbeton vor dem Eindringen etwaiger saurer, stark salzhaltiger oder kohlen säurehaltiger Bestandteile der Kanalwässer. Ob hier rein mechanische oder auch noch chemische Einflüsse sich betätigen, bedarf noch näherer Untersuchung.

Daß auch das Eisen in solchen Kanalisationsröhren unoxidiert bleibt, haben mehrfache Untersuchungen ergeben; selbst in 20 Jahre alten Eisenbeton-Kanalisationsröhren hatten sich die Eisenstäbe so erhalten, wie sie aus dem Walzwerk gekommen sind.

Gärungs-
flüssig-
keiten.

Sehr angebracht erschien die Anwendung des Eisenbetons für Behälter, in denen Gärungsflüssigkeiten aufbewahrt werden sollen; in bezug auf Wasserwiderstandsfähigkeit, Festigkeit und Sauberkeit würde er ein sehr schätzbares Material darstellen. Was die Einwirkung der in diesen enthaltenen Säuren und Salze beim Moste bzw. Weine an betrifft, so ist in dieser Hinsicht ein günstiges Resultat zu erwarten. Die in Frage kommenden organischen Säuren, die Homologen der Essigsäure: Weinsäure, meist als saures weinsaures Kalium, Äpfelsäure, auch Oxalsäure, haben bei dem geringen Grade ihrer Dissoziationskonstanten einen so geringen Aciditätsgrad, bzw. enthalten die Wasserstoffionen in so geringer Konzentration, daß eine Einwirkung auf das Calciumcarbonat des Eisenbetons nicht in Betracht kommt.

Von den im Most oder im Wein vorkommenden anorganischen Säuren, Phosphorsäure und Schwefelsäure, ist erstere ebenfalls schwach dissoziiert, und nur letztere würde, falls sie in größerer Konzentration vorkommen sollte, was wir nicht hoffen wollen, in der oben gekennzeichneten Weise den Eisenbeton schädigen.

Nur der Übelstand ist dabei aufgetreten, daß der Geschmack des Mostes oder Weines durch die andauernde Berührung mit Eisenbeton zu seinem Nachteil geändert werden kann; um diesem

¹⁾ Journ. Soc. Chem. Ind. 25, 719. 1906. The behaviour of colloids in sewage.

abzuhelfen, hat man diese Behälter mit Weinsäure getränkt, um als Überzug der Wände saures weinsaures Calcium zu erhalten.

Viel ungünstiger liegen diese Verhältnisse bei der Gärflüssigkeit des Biers; es rührt das daher, daß das Bier eine saure Reaktion aufweist, stammend von den in ihm enthaltenen Säuren, der Milchsäure, der Bernsteinsäure, Essigsäure und besonders der aus dem Hopfen entwickelten Hopfenbittersäure (Lupulinsäure) und Gerbsäure; namentlich die letztere ist infolge ihrer höheren Dissoziationskonstante wirksam, ferner herrührend von sauren Phosphaten, die infolge von hydrolytischer Spaltung Wasserstoffionen besitzen.

Aber auch die adsorbierte Kohlensäure wirkt auf das Calciumcarbonat des Eisenbetons ein; dieser Punkt ist bisher noch nicht genügend beachtet worden. Auch in Gärkellern, in denen Kohlensäure in großer Konzentration vorkommt, wird der Eisenbeton unter Mitwirkung des Wassers angegriffen.

Untergärige Biere besitzen allerdings unter 0,1%, meist 0,06—0,08%, gesamt auf $C_3H_6O_3$ berechnet, Säuregehalt; in dessen muß bei stetiger Erneuerung des Bieres auch schon diese Acidität für den Eisenbeton schädlich sein; und ferner spielen die Dissoziationskonstanten der sie bildenden Säuren dabei insofern eine Rolle, als auch bei solchem Säuregehalt die Konzentration der freien Wasserstoffionen relativ sehr hoch sein kann.

Ist infolge der biologischen Tätigkeit von Spaltpilzen der Gehalt an Wasserstoffionen stark angewachsen, indem sich Milchsäure und Essigsäure in größerer Menge gebildet haben, und dadurch das Bier „sauer“ geworden, so ist die Gefahr einer stärkeren Einwirkung auf den Eisenbeton um Bedeutendes vermehrt. Denn selbst sehr kleine Risse und Spalten an seiner Oberfläche sind schädlich, da sich in ihnen Krankheitserreger des Bieres festsetzen und Infektionen hervorrufen können.

Ohne Anwendung von Schutzmitteln kann die Anwendung des Eisenbetons für Gärgefäße nicht in Frage kommen.

Dabei spielt wiederum das abgespaltene Calciumhydroxyd eine Rolle; solange dieser Vorgang andauert, verbindet sich die Kohlensäure mit diesem zu primärem Calciumcarbonat, das zwar in reinem Wasser wenig löslich, in kohlensäurehaltigem aber um so löslicher ist. Keinesfalls darf in dieser Periode der Erhärtung die Gärflüssigkeit oder das Bier selbst mit dem Eisenbeton in Berührung gebracht werden.

Praktisch eingeführt sind bis jetzt die Doornkat-Zürnschen Behälter und die Biesenthaler Bottiche; bei dem ersteren System sind die Umfassungswände in Eisenbeton ausgeführt, an

der Innenseite ist eine etwa 2 cm starke Schicht einer pechartigen Masse angebracht, die an einem engmaschigen Spezialdrahtgeflecht befestigt ist, sie dient als Isolierschicht zwischen Gärflüssigkeit und Eisenbeton. Nach den bisher gemachten Erfahrungen soll der Geschmack des Bieres durch die Berührung mit der pechartigen Masse nicht gelitten haben.

Die Biesenthaler Bottiche sind so konstruiert, daß auf die Eisenbetonwände ein 2 cm starker Zementmörtelputz, der die Innenseite der Bottiche bekleidet, aufgetragen ist. Zu diesem Zementmörtel ist eine besondere Beimengung beigefügt, die verhindern soll, daß der Eisenbeton durch die saure Gärflüssigkeit des Biers zerstört wird. Doch ist dabei zu betonen, daß fast alle Zusätze zum Zement seine Erhärtungsfähigkeit wie seine Zug- und Druckfestigkeit schwächen und herabsetzen.

Auch für die Essigfabrikation würden mit einem geeigneten Schutzmittel versehene Entwicklungsgefäße von großem Vorteil sein.

Heiße Flüssigkeiten.

Heiße Flüssigkeiten greifen ebenfalls ein Eisenbetongefäß an; die Ursache ist, daß infolge des großen Temperaturunterschiedes von Außen- und Innenseite Spannungen entstehen; man schafft dann auf die Weise Abhilfe, daß man den Behälter mit einer Spundwand, die ringsum einen Zwischenraum freiläßt, umgibt, und diesen Raum vor der Einfüllung des Eisenbetonbehälters erwärmt.

Wasserdichtigkeit.

Bei allen diesen Vorgängen spielt die Wasserdichtigkeit des Zements bzw. Betons eine Rolle; da ist zunächst festzustellen, daß es vollständig wasserdichten Beton überhaupt nicht gibt; doch ist das so zu verstehen, daß bei normalem Beton kein Durchsickern des Wassers, sondern nur eine Durchfeuchtung stattfindet; die Wasserdichtigkeit ist annähernd proportional der Festigkeit des Betons. Die Druckfestigkeit des mit Wasser durchtränkten Betons ist geringer als die des trocknen, wie aus folgenden Zahlen hervorgeht:

Tabelle XIII.

1 Teil Zement, 2 Teile Kies, Druckfestigkeit nach 6 Wochen.

Trocken:	Mit Wasser getränkt:
546	486
543	456
510	486
506	490
513	480
Mittel: 524	472

Nicht jede Betonmischung kann als „wasserdicht“ bezeichnet werden; ein Maximum dieser Eigenschaft besitzt der Beton, der den genügenden Gehalt an Zement hat, gehörig gestampft ist, keine Hohlräume besitzt und noch mit Zement verputzt ist.

In der Praxis wird eine solche geeignete Mischung von Zement und Sand als „satter Beton“ bezeichnet; es ist in dieser Hinsicht festgestellt worden, daß satter Beton einen Mörtelbedarf von 50 % nicht zu übersteigen braucht, wenn die Korngröße richtig gewählt ist.

Das alles bedeutet aber nur, daß hinreichend Zement hinzugesetzt werden muß, damit sich beim Anrühren mit Wasser Kolloidstoffe in genügend großer Menge bilden können; denn diese sind es, welche die Wasserdichtigkeit des Eisenbetons bedingen.

Die „Wasserdichtigkeit“ wächst mit fortschreitendem Alter des Betons in dem Maße, als seine Festigkeit zunimmt. Ein Kalkzusatz soll die Wasserdichtigkeit erhöhen; er wird da, wo große Wasserdichtigkeit erforderlich ist, z. B. beim Bau von Talsperren, empfohlen; doch ist hierbei zu beachten, daß das Wasser erst nach vollständiger Erhärtung mit dem Eisenbeton in Berührung kommen darf.

Die Frage, ob Humusstoffe und moorige Substanzen nicht im Laufe der Zeit schädlich auf den Eisenbeton einwirken und sowohl den Zement wie das Eisen zerstören können, ist für den Tiefbau von allergrößtem Interesse. Denn mit der Einführung des Eisenbetons haben die früher bekannten und geübten Gründungsmethoden eine fast durchgreifende Veränderung erfahren; Grundverhältnisse, die früher die Aufführung von Bauten ausgeschlossen haben, sind nicht mehr imstande, noch nennenswerte Schwierigkeiten zu bereiten. Die neueren Betongründungsverfahren schrecken selbst vor Tribsand oder schwimmendem Grund nicht zurück.

Auch für die Talsperren ist das Verhalten der Humusstoffe von Wichtigkeit; es kann der untere Teil einer solchen längere Zeit mit ihnen, die sich aus zusammengehäuften verwesenden Blättern usw. gebildet haben, in Berührung kommen. Ferner können Eisenbetonrohre, die in einem moorigen und Humusstoffe enthaltenden Boden liegen, hierdurch Schädigung erleiden.

Diese Frage würde sehr einfach zu beantworten sein, wenn die Humusstoffe wirklich das wären, als was sie für gewöhnlich und in vielen Lehrbüchern bezeichnet werden, nämlich als Humussäuren.

Humus-
stoffe.

Dann würden sie zweifellos den Eisenbeton zerstören; denn alle Säuren, selbst sehr verdünnte und wenig dissoziierte, greifen, wie wir gesehen haben, den Zement an und beschleunigen die Oxydation des Eisens.

Indessen so einfach liegt diese Angelegenheit nicht; vom chemischen Standpunkt aus ist es noch ungewiß, welche Konstitution die Humusstoffe denn eigentlich haben.

Neuerdings ist in der Kgl. Bayerischen Moorkulturanstalt eine Untersuchung ausgeführt worden, deren Ergebnis war, daß die Humusstoffe keine Säuren sind; sie leiten den elektrischen Strom nicht, manche reagieren sauer, manche alkalisch.

Bei diesem problematischen Charakter der Humusstoffe liegt diese Angelegenheit so, daß diejenigen Humusstoffe, die wirklichen Säurecharakter haben, den Eisenbeton zerstören müssen, die neutralen und indifferenten, wie auch die alkalischen ohne irgendwelchen Einfluß auf ihn sind.

Bei diesem Stand dieses höchst wichtigen Problems für den Eisenbetonbau empfiehlt es sich jedenfalls, eine genauere chemische Untersuchung eines moorigen und Humusstoffe enthaltenden Bodens vornehmen zu lassen.

Gase. Von den Gasen ist besondere Aufmerksamkeit der schwefeligen Säure und dem Schwefelwasserstoff zu schenken. Beide können sich bei Gegenwart von Feuchtigkeit, Wasser mit dem hydrolytisch abgespaltenen Calciumhydroxyd zu Calciumsulfid verbinden und so den Eisenbeton zerstören. Diese Gase sammeln sich namentlich in Eisenbahntunnels in größerer Konzentration an und werden beim Verbrennen schwefelhaltiger Kohlen, der Saarkohle, der Braunkohle usw. in den Lokomotiven gebildet. Die Einwirkung dieser Gase auf den vollständig erhärteten Eisenbeton ist sehr gering.

Soll daher eine Tunnelwandung mit Eisenbeton umkleidet werden, so ist es unumgänglich notwendig, die Verschalungen nicht eher zu entfernen, als bis der Beton vollständig abgebunden und die ersten Stadien der Erhärtung überwunden hat; anderenfalls tritt die oben geschilderte Reaktion ein.

Aber auch auf den Kalkmörtel eines Tunnels wirkt die schweflige Säure ein; durch Wasserbindung und Oxydation geht sie in Schwefelsäure über, die sich mit dem Kalk des Mörtels zu einem sauren schwefelsauren Salz des Calciums, einem Calciumhydrosulfat, $\text{CaH}_2(\text{SO}_4)_2$, das sich in kolloidem Zustande be-

findet, verbindet¹⁾ und so allmählich den Mörtel „zerfrißt“; es bildet sich daher eine plastische, breiartige Masse, wie ich das z. B. beim Tunnel bei Hönebach zwischen Eisenach und Bebra beobachtet habe²⁾. Hier ist notwendig, unter Berücksichtigung der oben erwähnten Vorsichtsmaßregel den Kalkmörtel durch Zementmörtel zu ersetzen.

In letzter Zeit sind ferner einige Beobachtungen über das Verhalten des Eisenbetons dem elektrischen Strom gegenüber gemacht worden. Es ist konstatiert worden, daß Ströme von hoher Spannung oder großer Stromstärke, wenn diese nur einmal oder zweimal durch das Eisenetz des Betons fließen, diesen nicht so schwer schädigen, als vielmehr Ströme von niedriger Spannung und kleiner Stromstärke, die regelmäßig und oft das Eisen durchströmen.

Der elektrische Strom.

Dadurch wird zunächst die große Adhäsion zwischen Eisen und Beton, die im Kapitel IV näher beschrieben worden ist, gelockert und aufgehoben; die weitere Folge ist, daß dadurch die Schutzwirkung des Zements auf das Eisen nicht zur Geltung kommt; es können Feuchtigkeit und Luft bzw. Sauerstoff zum Eisen gelangen; dann sind aber die Bedingungen gegeben, unter denen das Eisen sich oxydiert.

Namentlich in größeren Städten wird man bei der starken Ausdehnung der elektrischen Industrie und der elektrischen Bahnen und der dabei vorkommenden Rückleitung und Vagabundierung der Ströme durch die Erde diesen Vorgängen besondere Aufmerksamkeit schenken müssen.

Das Mittel, das in solchen Fällen zum Schutze des Eisenbetons angewendet werden muß, besteht in seiner Isolierung gegen Feuchtigkeit, die durch ein im nächsten Kapitel besprochenes Zementschutzmittel am besten erreicht wird.

Dagegen ist ein Eisenbetonbau auch ohne Blitzableiter vor Blitzgefahr gesichert; bei einem Gewitter werden sämtliche Gebäudeteile mit Elektrizität geladen, so daß zunächst eine abwehrende Wirkung der Blitzgefahr hervorgerufen wird und die Elektrizität dann auf den das ganze Bauwerk durchziehenden metallischen Leitern stetig zur Erde abfließt und daher ein Anlaß zu einem plötzlichen Ausgleich zwischen der elektrischen Spannung der Luft und der Erde fehlt.

Blitz.

¹⁾ P. Rohland, Über die Hydrosulfate des Bariums und Calciums. Zeitschr. f. anorg. Chemie 65, 206. 1910.

²⁾ Unter freundlicher Führung von Herrn Regierungsbaumeister Dr. von Willmann-Eisenach. S. a. s. Abhandlungen.

Und selbst bei Einschlag kann der Blitz ohne Gefährdung des Eisenbetonbaus in das Erdreich abgeführt werden, zumal wenn die Bodenplatte im Grundwasser liegt. Man hat schon mehrfach das Eisengerippe als Blitzableiter benutzt, so neuerdings bei den Neubauten der Bonner Zementfabrik, ausgeführt von der Firma Hüser & Co. in Oberkassel bei Bonn.

Höhere
Temperatur.

Auch das Verhalten des Eisenbetons gegen höhere Temperatur wird durch zwei „zufällige Umstände“ günstig beeinflusst; Beton nämlich hat eine geringe Wärmeleitungsfähigkeit, worauf sein Widerstand gegen höhere Temperatur und Feuer beruht. Wenn seine Oberfläche mehrere Stunden hoher Temperatur ausgesetzt ist, sinkt sie innerhalb, schon in einer Tiefe von 2,5 cm, unter der Oberfläche um mehrere 100°.

Dabei sind die zugesetzten Sande und Kiese von Bedeutung. Um größere Feuerbeständigkeit zu gewährleisten, sollen es möglichst poröse Stoffe sein, Schamotte, Schlacke, Bimsstein, Basalt usw., was allerdings mit den Anforderungen, die an die Festigkeit des Betons gestellt wurden, einigermaßen in Widerspruch steht. Weniger empfehlenswert ist dichtes Material, wie Quarz, Granit, ganz unbrauchbar Kalksteine, wegen ihrer Dissoziation von ca. 400° an in Calciumoxyd und Kohlensäure.

Ferner hängt die Feuerbeständigkeit vom Alter des Betons ab; junger Beton zeigt viel geringere Widerstandsfähigkeit gegen höhere Temperatur als völlig erhärteter; es rührt das daher, daß das Wasser noch nicht vollständig gebunden ist, und daß die abgespaltenen Stoffe im kolloiden Zustand noch nicht vollständig koaguliert und erhärtet sind.

Solange noch nicht gebundenes Wasser im Beton vorhanden ist, solange vor allem die kolloiden Stoffe noch in koagulierendem Stadium sind, der Zement daher noch nicht vollständig erhärtet ist, solange ist auch die Feuerbeständigkeit des Eisenbetons geringer; der erhärtete Eisenbeton dagegen kann höhere Temperatur ertragen, ohne Schaden zu nehmen, besonders eignen sich Eisenbetonkörper zur Herstellung von feuerbeständigen Treppen.

Schließlich steht die Feuerbeständigkeit des Eisenbetons in Beziehung zu seiner Dichtigkeit; er ist um so weniger feuerbeständig, je dichter er ist. Das beste Bindemittel ist auch hier der Portlandzement, während Romanzemente, die bei niedrigerer Temperatur, ca. 1000°, gebrannt sind, bei hoher ihr Volumen vergrößern und dadurch eine Sprengung hervorrufen.

Im allgemeinen nimmt bei höherer Temperatur die Zugfestig-

keit des Zements ab; wenn er 6 bis 7 Stunden lang der Rotgluthitze ausgesetzt ist, beträgt die noch vorhandene Zugfestigkeit etwa 30 v. H.

Der andere Bestandteil des Eisenbetons, das Eisen, besitzt allerdings nicht die Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperatur und Feuer, wie der Beton. Schweiß- und Flußeisen bleibt nur bis zu einer Temperatur von etwa 600° tragfähig; im allgemeinen ist Schweißeisen widerstandsfähiger als Flußeisen; bei 1000° ist der Schmelzpunkt des Schweißeisens erreicht; bei 50° ist geringste Zugfestigkeit 3800 kg/qcm, bei 240° die größte mit 5150 kg/qcm, die kleinste Dehnung bei 160° 19 v. H.¹⁾

Der zweite günstige Umstand in bezug auf die Feuerbeständigkeit ist die annähernde Übereinstimmung der Ausdehnungskoeffizienten des Betons und Eisens, wie wir im Kapitel II gesehen haben; auch bei höherer Temperatur ist die Verschiedenheit nicht groß; für Beton für 1° 0,00001370, für Schweißeisen von 0° bis 100° 0,00001212, von 0° bis 300° 0,00001468; für Flußeisen von 0° bis 100° 0,00001176.

Ist nun auch die Widerstandsfähigkeit des Eisens gegen höhere Temperatur und Feuer geringer, so schützt eben der Beton wegen seiner geringen Wärmeleitungsfähigkeit das Eisen vor diesen, und zwar soll diese Schutzschicht 50—56 mm betragen. Die nahe Übereinstimmung der Ausdehnungskoeffizienten verhindert aber, daß auch bei höherer Temperatur Spannungen und Risse auftreten.

Auch die Widerstandsfähigkeit des Eisenbetons gegen Verwitterungen, klimatische Einflüsse aller Art ist bemerkenswert.

Widerstandsfähigkeit gegen Verwitterungen.

Viele natürliche Hausteine, z. B. Sandsteine, unterliegen diesen Einflüssen in viel stärkerem Maße; als Bindemittel der einzelnen Steinpartikel enthalten sie meistens Eisenspat, kohlen-saures Eisenoxydul, das hydrolytisch in Kohlensäure und Eisenoxydul, das sich zu Eisenoxyd oxydiert, gespalten wird.

Dadurch wird allmählich eine Zerstörung der Sandsteine herbeigeführt, die dann durch biologische Vorgänge, durch die Tätigkeit von Flechten, die in den entstehenden Rissen und Sprüngen der Sandsteine wachsen, unterstützt wird; kommen aber noch besonders stark angreifende Agenzien hinzu, die in der Atmosphäre vorhanden sind, wie schweflige Säure in der Umgebung der Fabrikstädte, so werden die Bindemittel der Sandsteine sehr rasch zerstört. Der Verwitterungsprozeß schreitet

¹⁾ Handbuch f. Eisenbetonbau I. c.

schnell vorwärts, wie das am Kölner Dom und Ulmer Münster zu beobachten ist.

Vollständig erhärteter Eisenbeton bleibt allen solchen Verwitterungseinflüssen gegenüber intakt.

Erdbeben. Schließlich ist der Eisenbeton das einzige erdbebensichere Baumaterial, wie das in letzter Zeit die Erdbeben in Messina und Reggio dargetan haben. Ein Eisenbetonbau ist gewissermaßen aus einem Guß, während ein Haustein- oder Ziegelbau erst durch den Mörtel zwischen den einzelnen Steinen zusammengehalten wird und daher auf Erschütterungen leicht reagiert.

Wie man aus den vorstehenden Untersuchungen erkennt, stehen den großen Vorzügen des Eisenbetons einige Nachteile gegenüber; nur sind sie im Vergleich mit denen, die andere Baumaterialien aufweisen, und im Vergleich zu seinen Vorzügen relativ gering; verschiedene können durch Eisenbeton-Schutzmittel, wie wir im Kapitel VI sehen werden, gemildert und beseitigt werden.

Einige Mängel, wie die Zerstörbarkeit durch Säuren, sind in der Konstitution des Zements selbst begründet.

Trotz dieser Nachteile und Mängel wird sich der Eisenbeton ein noch größeres Verwendungsfeld, als er es zurzeit schon hat, erobern.

In wirtschaftlicher Hinsicht besteht für den Eisenbeton ein großer Fortschritt darin, daß die Anlagekosten gegenüber Stein- oder Eisenkonstruktionen vielfach geringere sind und der Unterhaltungsaufwand ebenfalls unbedeutend ist.

Die wuchtigen Formen, die der Eisenbeton den aus ihm ausgeführten Bauten, öffentlichen Gebäuden, Warenhäusern usw. verleiht, ein geringerer Rauminhalt der Konstruktion im Vergleich zum Steinbau, die Schnelligkeit der Errichtung, die dieser Baustoff gestattet, seine große Formfähigkeit gegenüber den natürlichen Bausteinen sind außer den vortrefflichen physikalischen und chemischen Eigenschaften in bautechnischer und architektonischer Hinsicht die weiteren Vorzüge des Eisenbetons.

VI.

Die Eisenbeton-Schutzmittel.

Wie wir im vorhergehenden Kapitel gesehen haben, sind es vor allem drei Stoffarten, die den Eisenbeton angreifen und zerstören:

1. Säuren und saure Salze,
2. Magnesiumsalze (Meerwasser) und Schwefelverbindungen,
3. kohlen säurehaltiges Wasser.

In allen den Fällen, wo eine Befürchtung besteht, daß eine Zerstörung des Eisenbetons durch diese eintreten könnte, müssen Schutzanstriche zur Verwendung gelangen. Diese Angelegenheit hat für den Eisenbeton ganz enorme Bedeutung; in vielen Fällen ist seine Anwendung ohne einen solchen ganz unmöglich; und für den Techniker und Bauleiter, der hierbei vom Physiker und Chemiker unterstützt werden muß, erwächst die Pflicht, unter den zahlreichen bis jetzt in den Handel gebrachten Schutzmitteln das für den gerade vorliegenden Fall passendste auszuwählen.

An einen brauchbaren Schutzanstrich aber müssen im allgemeinen folgende Anforderungen gestellt werden: Das Schutzmittel darf selbst nicht in irgendwelcher Weise von den Stoffarten, vor denen es den Eisenbeton schützen soll, angegriffen werden; zweitens muß die Verfestigung des Schutzmittels am Eisenbeton eine tadellose und dauernde sein, so daß Reparaturen selten nötig sind; und drittens darf das Schutzmittel in keiner Weise chemisch auf den Eisenbeton einwirken; es muß sich diesem gegenüber durchaus indifferent verhalten. Auch darf das Schutzmittel den Geschmack der mit ihm in Berührung stehenden Flüssigkeit, des Biers, des Weins, nicht beeinflussen.

Anfor-
derungen.

Nach diesen Gesichtspunkten müssen die bisher in den Handel gebrachten und bisher angewandten Schutzmittel beurteilt werden.

Harze, Paraffine, Lacke können hierbei zur Anwendung kommen; ferner teer- und asphaltartige Stoffe, wie Inerthol, Mammut, Nigrit; Schutzmittel, die den Namen Aquabar, Ceresit tragen; letzteres soll besonders die Wasserdichtigkeit erhöhen; die Fluatsalze, Salze der Kieselfluorwasserstoffsäure endlich dienen besonders zur Härtung des Zements.

Für Bauten im Meerwasser sind als Schutzmittel, und um die Wasserdichtigkeit zu erhöhen, Sulfate und Magnesiumsalze

Schutz-
mittel gegen
Meerwasser.

vorgeschlagen worden; indessen sind Sulfate durchaus zu vermeiden; durch Einwirkung auf den hydrolytisch abgespaltenen Kalk bildet sich Gips, und so wird die Oberfläche des Eisenbetons zerstört; ist letzterer aber vollständig erhärtet, so sind die Sulfate zwecklos, da sie eine größere Wasserdichtigkeit doch nicht hervorgerufen.

Die Magnesiumsalze sollen die Wirkung haben, daß sich vollkommen unlösliche Oxyde und Oxychloride bilden; indessen erscheint das zweifelhaft. In welcher Weise die Umsetzung der Magnesiumsalze mit dem hydrolytisch abgespaltenen Kalk erfolgt, haben wir im Kapitel V gesehen; und es empfiehlt sich, bei dem dort angegebenen Mittel zu bleiben, nämlich Betonblöcke, die für Meeresbauten bestimmt sind, so lange in Süßwasser erhärten zu lassen, bis die Kalkabspaltung im wesentlichen vorüber ist und die Magnesiumsalze nicht mehr mit diesem in Reaktion treten können.

Nigrit.

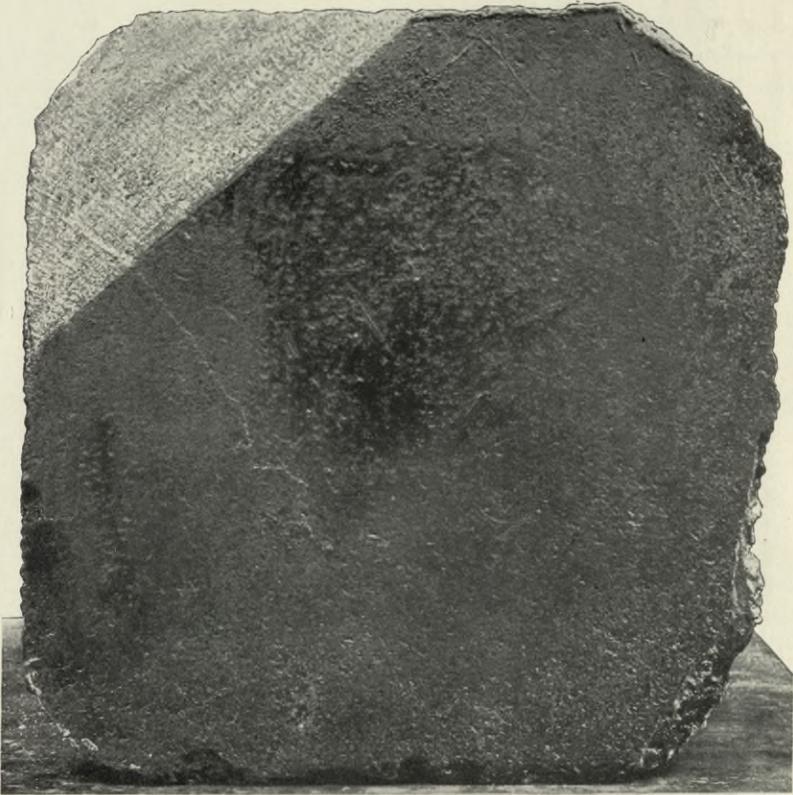
Von den genannten Zementschutzmitteln habe ich das von den Farbenfabriken Rosenzweig & Baumann in Cassel hergestellte Schutzmittel ‚Nigrit‘ gegen verdünnte Säuren, kohlen-säurehaltiges Wasser, auch gegen Ammoniakwasser, geprüft¹⁾.

Als Versuchsmaterial dienten Betonstücke aus der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart, die mit verschiedenen feinen, gröberen und groben Kiesen versetzt und teilweise auf ihrer Oberfläche mit einem Zementputz versehen waren. Sie waren vollständig erhärtet. Nigrit wurde zweimal auf diese Betonstücke aufgetragen, das zweite Mal nach vollständiger Eintrocknung.

Um der Wirklichkeit möglichst nahe zu kommen, wurden verdünnte Säuren, etwa 1—1½prozentige, mit den Betonstücken in Berührung gebracht, und zwar wurde eine anorganische Säure, Salzsäure, und eine organische Säure, Essigsäure, gewählt. Auch das Ammoniakwasser hatte die Konzentration wie die Säuren.

Als kohlen-säurehaltiges Wasser wurde solches aus dem Schwarzwald genommen, nämlich Teinacher, das in 100 000 Teilen 257,8785 Teile freie und halbgebundene Kohlensäure, d. h. im Liter 1403,505 cem hatte, also sehr kohlen-säurereich war. Ferner wurden im Laufe dreier Wochen, während welcher die Versuche dauerten, diese Flüssigkeiten öfter erneuert, und zwar in der gleichen Konzentration.

¹⁾ Deutsche Bauzeitung 5. 10. 1907.



Betonblock, in Teinacher Wasser gelegen, mit Nigritanstrich.
Obere Ecke links Nigrit entfernt.

Die Versuchsergebnisse waren die folgenden: Abgesehen von kleinen Aufblähungen, die sich bei den Versuchen mit Säuren an den Rändern der Betonstücke zeigten, war nirgends der Zusammenhang zwischen Beton und ‚Nigrit‘ gelockert worden; Ablösungen des ‚Nigrit‘ vom Beton hatten nicht stattgefunden; Risse und Spalten konnten nicht wahrgenommen werden. ‚Nigrit‘ hatte sich in die Poren des Zements eingesaugt. Ein Vordringen der angewandten Flüssigkeiten bis an die Oberfläche des Betons erscheint ausgeschlossen. Wo von einem Betonstück absichtlich nach Beendigung der Versuche ‚Nigrit‘ entfernt worden war, war es unbeschädigt (Tafel II). Der Riß war schon vor Auftragung des ‚Nigrit‘ in dem Betonblock.

Für besondere Zwecke, zur Aufnahme für Bier, Wein, Öle usw., können Eisenbetongefäße zur Anwendung gelangen, die mit Glastafeln bekleidet sind, auch Steinzeugtafeln kommen in Betracht.

Gärgefäße,
Tanks etc.

Diese Methode würde so ziemlich den oben gekennzeichneten Anforderungen entsprechen; diese Flüssigkeiten greifen das Glas nicht an, Glas wirkt nicht chemisch auf den Eisenbeton ein, auch beeinflußt es nicht den Geschmack dieser Flüssigkeiten.

Indessen wird hierbei die zweite Bedingung nicht erfüllt; dieses Verfahren hat nämlich den Nachteil, daß, da nur kleine Glastafeln zur Verwendung gelangen können und keine risselose Fläche gebildet wird, sehr viele Fugen entstehen, in denen die betreffende Flüssigkeit mit dem Eisenbeton in direkte Berührung treten kann; so wird also der Zweck dieser Methode teilweise illusorisch gemacht; auch die Reinigung der Gefäße wird infolgedessen erschwert.

Nun lag ja der Gedanke nahe, die Eisenbetonwandungen eines solchen Gefäßes einfach mit einem Schutzanstrich von Ölen, Paraffin, Lacken zu versehen; ein kleiner Nachteil bei diesem Verfahren liegt allerdings darin, daß bei dem Auftragen des Schutzanstrichs kleine Bläschen sich bilden können, die dann zu sehr kleinen Rissen sich erweitern können.

Ein Hauptfehler ist aber bei dieser Methode bisher gemacht worden: es ist dabei übersehen worden, daß, wie wir im Kapitel III gesehen haben, vom Zement beim Anrühren mit Wasser, beim Abbinden und in erster Erhärtungsperiode, sobald er immer mit einer wässrigen Flüssigkeit in Berührung tritt, Calciumhydroxyd hydrolytisch abgespalten wird. Diese alkalische Reaktion ist nun insofern nützlich, als sie zwar das Eisen vor der Oxydation schützt, andererseits aber auch schädlich, weil der abgespaltene Kalk

die in den Lacken, Harzen, Paraffinen, Ölen enthaltenen Fette verseift.

Diese Verseifungen machen sich äußerlich dadurch geltend, daß größere Flecke sich an solchen Stellen bilden; die darüber befindliche Schicht wird dadurch zu schwach und beim geringsten Anlaß eingedrückt. Zwar lassen sich solche beschädigten Stellen leicht ausbessern; aber es tritt bald wieder Verseifung ein. Es ergibt sich aber daraus die Maßregel, daß Paraffine, Öle, Lacke erst dann auf die Eisenbetonwandung aufgetragen werden dürfen, wenn die Kalkabspaltung sich sehr verringert hat und die Erhärtung weiter vorgeschritten ist.

Zement-
kunststeine.

Die jüngste unserer Industrien, die mit Eisenbeton arbeitet und sich beispiellos schnell aus kleinen Anfängen und von noch keineswegs hervorragenden Fabrikaten aus zur schönsten Blüte entwickelt hat, klagt häufig über die Auswitterungen, die namentlich an gefärbten Zementkunststeinen, wie Zementdachsteinen, Mosaikplatten, auftreten. Die Ursachen zu solchen sind einmal im Gehalt an wasserlöslichen Salzen und im hydrolytisch abgespaltenen Kalk zu suchen; je größer die Löslichkeit eines Salzes ist, um so näher ist die Gefahr der Auswitterung gerückt; aber auch schwerer lösliche Salze, wie Gips, Calciumhydroxyd, Calciumcarbonat, können die Veranlassung zu solchen Auswitterungen sein.

Ferner ist die Porosität eines solchen Zementkunststeines in Betracht zu ziehen; je dichter ein solcher ist, um so stärker werden die Ausblühungen hervortreten. Das ist besonders nachteilig für die Zementwarenfabrikation, da durch die Pressungen der Steine eine hohe Dichtigkeit erzielt wird.

Denn in einem sehr porösen Material können die Salze auch innerhalb desselben auskrystallisieren, wenn das Wasser verdunstet; in einem dichten wird jedoch das Wasser an die Oberfläche des Materials getrieben, und mit ihm die wasserlöslichen Salze; verdunstet es dann, so erscheinen diese Ausblühungen meistens weiß, seltener gelb oder grün.

Auswitte-
rungen.

Und zwar erscheinen diese Salze in quantitativer Weise wieder an der Oberfläche, und auch geringe Mengen machen sich unliebsam bemerkbar. Das zeigt folgender Versuch: Setzt man zum Anmachewasser des Gipses etwas Kupfersulfat, etwa ca. 0,05 g, so erscheint der abbindende und erhärtende Gips zunächst noch rein weiß, erst nach mehreren Stunden erscheint das blaue Kupfersulfat an der Oberfläche, und zwar quantitativ.

Das leicht lösliche Kupfersulfat diffundiert nach der Oberfläche, während die Gipskrystalle sich immer dichter bei der Erhärtung zusammenschließen, und wittert hier aus.

Es ist auch bei allen Ausblühungen zu beobachten, daß die hervorragenden Ecken und Spitzen des Materials am meisten von diesen getroffen werden; es liegt das einfach daran, daß das Wasser sich zunächst in diese Spitzen und Ecken hineinzieht, und mit ihm die löslichen Salze.

Die Schädigung des Materials wird nun auf folgende Weise hervorgerufen: Während ohne Auswitterung das Material eine dichte und zusammenhängende Oberfläche besitzt, wird seine Oberfläche infolge der Ausblühungen gelockert; indem die löslichen Salze mit dem Material zusammen krystallisieren, wird die Oberfläche des Materials uneben, undicht und locker; seine Oberfläche wird vergrößert und bietet nunmehr dem Wasser eine größere Angriffsfläche dar.

Ferner können die Auswitterungen aus Soda und Pottasche bestehen, die erst nachträglich zugesetzt werden, um aus einem „Langsambinder“ einen „Raschbinder“ zu machen. Solche Zemente sollten bei der Kunststeinfabrikation ausgeschlossen sein.

Zweitens muß das angewendete Wasser und die Sande und Kiese für die Bildung von Auswitterungen verantwortlich gemacht werden; schon das Wasser enthält lösliche Salze genug, um sie hervorzurufen; und auch die Sande und Kiese sind nicht von solchen frei; sie müßten also gewaschen und gereinigt werden, manche wohl mehrmals, um die späteren Auswitterungen zu verhüten.

Das würde aber die Zementwarenfabrikation, die mit billigen Materialien und einfachen Methoden arbeiten muß, um mit den anderen Baustoffindustrien in Wettbewerb treten zu können, zu sehr verteuern.

Es entsteht nun die Frage: Wie können diese schädlichen Auswitterungen an Kunststeinen vermieden werden? Zahlreiche Vorschläge und Versuche sind schon gemacht worden, aber vergeblich.

Doch lassen sich auf Grund der kolloidchemischen¹⁾ Konstitution des Zements einfache Mittel angeben, die diese Auswitterungen vollständig verhindern.

¹⁾ P. Rohland, Der kolloide und krystalloide Zustand der Materie. Lehmanns Verlag. Stuttgart 1910.

Bewährte Hilfsmittel für den Bautechniker!

Kostenberechnungen für Ingenieurbauten. Begründet von **Georg**

Osthoff. 6. gänzlich umgearbeitete u. vermehrte Auflage. Neu herausgegeben von Reg.- u. Baurat **Scheck** unter Mitwirkung hervorragender Fachmänner. Ca. 900 Seiten Lexikonformat. Gebunden M. 25.—
Zentralblatt der Bauverwaltung (Prof. H. Engels-Dresden): ... Wir müssen es uns versagen, auf Einzelheiten einzugehen, können aber nach sorgfältiger Durchsicht des Buches sagen, daß es in ausgezeichnete Weise dem Bauingenieur die Unterlagen gibt, nach denen er die Selbstkosten einer Unternehmung selbständig berechnen kann. Nicht nur der erfahrene Baumeister, sondern namentlich auch der in die Praxis eintretende Anfänger wird das Werk als ein unentbehrliches Handbuch schätzen lernen.

Kostenberechnungen für Hochbauten. Begründet von **C. Schwatlo.**

16. gänzlich umgearbeitete und vermehrte Auflage. Bearbeitet und herausgegeben von Magistratsbaurat **H. Winterstein**, Charlottenburg. Über 900 Seiten Lexikonformat. Gebunden M. 25.—

Zentralblatt der Bauverwaltung: Für die notwendig gewordene Umarbeitung des altbekannten und bewährten „Schwatlo“ hat auf eine Anfrage hin der Vorstand des Berliner Architektenvereins den Verfasser vorgeschlagen; nach dem vorliegenden übersichtlichen, eingehend und gewissenhaft durchgearbeiteten Werk kann die Wahl als eine sehr glückliche bezeichnet werden. ... Im einzelnen ist die Durcharbeitung überaus gründlich, klar, in gutem Deutsch geschrieben und ohne die besonders bei technischen Bedingungen üblichen Längen.

Musterbuch für Eisenkonstruktionen. Herausg. im Auftrag des Vereins

Deutscher Eisen- und Stahlindustrieller von **C. Scharowsky.** 4. Auflage. Unter Benützung von Vorarbeiten von C. S. neu bearbeitet u. wesentlich erweitert v. **R. Kohnke**, Prof. a. d. Techn. Hochschule Danzig. Folioformat. Mit zahlr. Abbildungen und 42 Tafeln. Geheftet M. 12.—, geb. M. 14.—

Eisenbeton: „... Das vorliegende Werk ist eines derjenigen Bücher, die heute in keinem technischen Bureau fehlen dürfen und mit der Zeit ein unentbehrliches Hilfsmittel für den Eisenkonstruktionsingenieur geworden sind. Die ungeheure Mühe u. Arbeit, welche durch seine Benutzung gespart wird, steht in gar keinem Verhältnis zu dem geringen Anschaffungspreis.“

Beton und Eisen: „... Dieses ausgezeichnete Buch, das wohl auf keinem Tische eines Eisenkonstruktors fehlen dürfte, stellt sich in seiner neuen Auflage höchst vorteilhaft dar, und es steht wohl außer Zweifel, daß sowohl durch die einwandfreie äußere Form als auch durch die sorgfältige Durcharbeitung die Zahl seiner Freunde nur zunehmen kann.“

Gewichtstabellen für Flußeisen. Hauptsächl. verwendbar

im Eisenhoch-, Brücken- u. Schiffbau, ferner im Maschinen- u. Hüttenfach. Von **C. Scharowsky.** Gebunden M. 8.—. (Mit dem spezifischen Gewicht 7,85 berechnet!)

Zentralblatt der Bauverwaltung: „... Das vorliegende Tabellenwerk schließt eine Lücke, die sich schon lange jedem Konstrukteur störend bemerkbar gemacht hat. Die Tabelle, die geschickt angeordnet ist, kann allen in Frage kommenden Kreisen warm empfohlen werden.“

Widerstandsmomente und Gewichte genieteteter

Träger. Berechnung von 32000 geniet. Trägern, enth. als Gurtwinkel die Normalprofile f. Winkeleisen v. 50–130 mm Schenkelbreite, als Gurtplatten Flacheisen in 6 verschied. Breiten und den Gesamtdicken v. 5–39 mm. Von **C. Scharowsky.** Folioformat. Geh. M. 8.—, geb. M. 10.—

Säulen und Träger. Tabellen über die Tragfähigkeit eiserner Säulen u. Träger. Auszug aus dem im Auftrage des Vereins Deutscher Eisen- u. Stahlindustrieller v. **C. Scharowsky** herausg. „Musterbuch f. Eisenkonstruktionen.“ Taschenformat. Geh. 60 Pfg.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000297578