

Erfahrungen mit Spezialzementen¹⁾.

Von Prof. Dr. RICHARD GRÜN, Düsseldorf.

Direktor des Forschungsinstitutes der Hüttenzementindustrie.

(Eingeg. 25. November 1935.)

Die Spezialzemente, die besonders für Talsperren und sonstige Wasserbauten in Frage kommen, teilt man zweckmäßigerweise in 2 große Gruppen ein, nämlich in einfache Zemente und zusammengesetzte Zemente.

Die einfachen Zemente sind zunächst

- I. der normale Portlandzement,
- II. die Spezialzemente, also kieselsäurerreiche Portlandzemente mit geringer Abbindewärme und höherer Widerstandsfähigkeit gegen Salzlösungen,
- III. die Erz- und Kühlzemente, bei welchen ein Teil der Tonerde ersetzt ist durch Eisenoxyd,
- IV. die Tonerdezemente.

Als Übergang zu den zusammengesetzten Zementen seien die Portlandzemente erwähnt, welchen man einen geringen Kalkzusatz gibt, um die Wasserdichtigkeit zu erhöhen.

Die zusammengesetzten Zemente werden ausnahmslos hergestellt unter Verwendung einer Puzzolane, deren Erhärtungsfähigkeit angeregt wird durch Zusatz von Kalk oder kalkabspaltendem Klinker, wobei unter Umständen dieser Klinkergehalt so hoch gesteigert werden kann, daß er selbst einen Teil der Erhärtung übernimmt, so daß dann diese klinkerreichen Puzzolane einen Übergang zu Portlandzement bilden. Es entstehen auf diese Weise

- I. die Kalk-Traß-Zemente, die von Intze für Talsperrenbauten vor Jahren bereits verwandt wurden,
- II. die Traßzemente, die aus Portlandzement mit einem Zusatz von Traß bestehen,
- III. die Ziegelmehlzemente, die schon von den Römern hergestellt wurden durch Zufügung von Backsteinmehl zu hydraulischem Kalk und welche heute aus Portlandzement unter Zusatz von gebranntem Kaolin aufbereitet werden,
- IV. die Gaizezemente, die in Frankreich besondere Bedeutung haben,

- V. die Molerzemente in Dänemark,
- VI. die Kalkstein- und Sandmehlzemente,
- VII. die für eisenerzeugende Länder wichtigen Hochofenschlacke-haltigen Zemente, die Hüttenzemente, die für Deutschland zerfallen in die klinkerreichen Eisenportlandzemente und die klinkerarmen Hochofenzemente.

Zemente, die in der Hauptsache aus Hochofenschlacke bestehen, sind die Hochofenschlackenzemente, welche entweder aus Hochofenschlacke mit geringem Kalkzusatz bestehen oder Gipszusatz enthalten,

- VIII. die Kieselgur- und Si-Stoff-Zemente und
- IX. die Vereinigung verschiedener Puzzolane mit Kalk oder Klinker nach I bis VIII.

Einen Überblick über die chemische Zusammensetzung dieser Zemente gibt Abb. 1.

Die Erfahrungen sind teils im Laboratorium, teils in der Praxis gemacht worden; folgende wichtige Eigenschaften sollen besprochen werden: Abbindewärme, Festigkeit, Wasserdichtigkeit, Kohlensäurebeständigkeit und Sulfatbeständigkeit.

A. Einfache Zemente.

Die Abbindewärme des Portlandzementes ist verschieden von Marke zu Marke und liegt i. allg. über der Abbindewärme der zusammengesetzten Zemente, da alle Zusätze, die bei deren Herstellung verwendet werden, reaktionsträger sind als der Klinker und schon aus diesem Grunde die Abbindewärme drücken; sie liegt dagegen unter der Abbindewärme des Tonerdezementes, da das Abbinden der Aluminate eine stärker exotherme Reaktion ist als diejenige der Silicate des Portlandzementes. Entsprechend haben auch tonerdearme Portlandzemente eine geringere Abbindewärme als tonerdereiche.

Beim Bau des Hooverdammes wurden besondere Spezialzemente hergestellt, die wesentlich geringere Abbindewärme freisetzen als normale Portlandzemente. Diese Zemente zeichnen sich vor allen Dingen durch einen hohen Gehalt an Dicalciumsilicat, dagegen einen Mangel an Tricalciumsilicat und Tricalciumaluminat aus und erhärteten deshalb auch zu wesentlich geringerer Festigkeit als normale Portlandzemente.

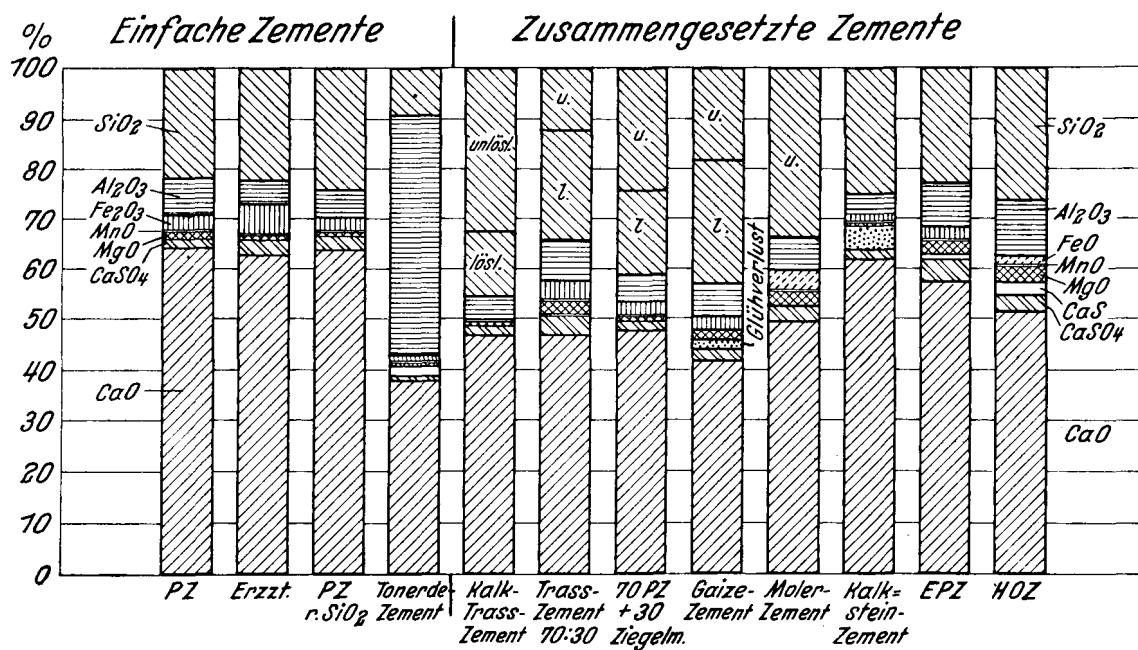


Abb. 1. Chemische Zusammensetzung verschiedener Zemente.

¹⁾ Vortrag auf der Tagung der Arbeitsgruppe für Spezialzemente des Internationalen Talsperrenkomitees der Weltkraftkonferenz am 29. Oktober 1935 im Harnack-Haus, Berlin-Dahlem. Bericht der übrigen Vorträge s. diese Ztschr. 49, 39 [1936].

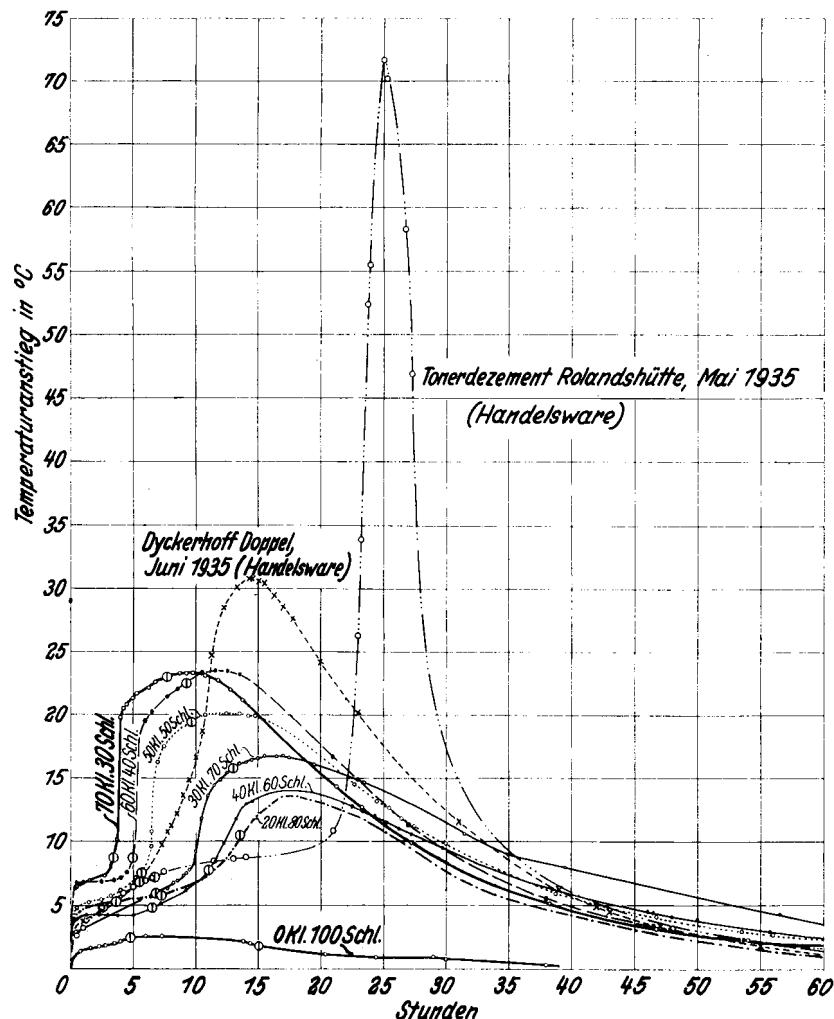


Abb. 2. Messungen der Erhärzungstemperaturen von Handelsportland- und Tonerdezement und von Mischungen aus Portlandzementklinker und Hochofenschlacke.

Auch die Abbindewärme, die beim Erhärten des Erzementes frei wird, ist etwas geringer als die von normalem Portlandzement, da in ihm ein Teil der Tonerde durch Eisenoxyd ersetzt ist. Abb. 2 zeigt eine Gegenüberstellung

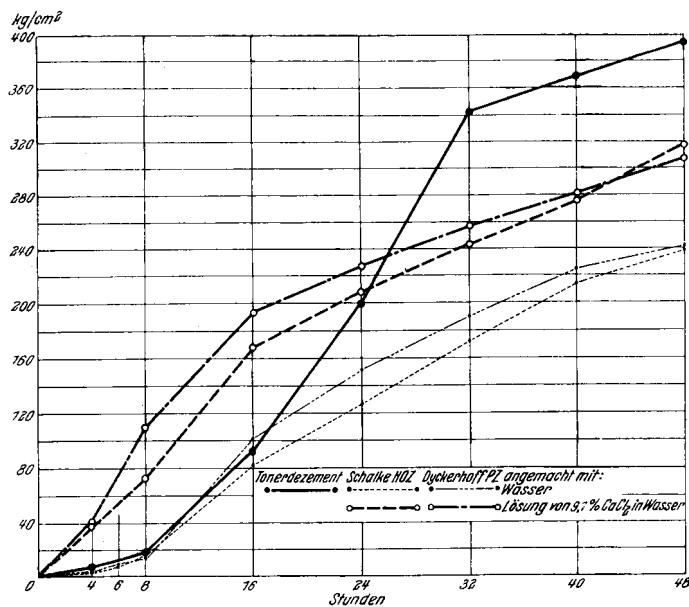


Abb. 3. Verlauf der Normendruckfestigkeit von Tonerdezemen angemacht mit Wasser im Vergleich zur Normendruckfestigkeit von Schalke HOZ und Dyckerhoff PZ angemacht mit Wasser und mit einer Lösung von 9,1% CaCl_2 .

verschiedener Handelszemente. Jeweils 150 g des betr. Purzementes wurden mit 50 g Wasser angemacht und in Thermosflaschen eingebracht; dann wurde die Abbindetemperatur gemessen. Die Thermosflaschen waren vorher geeicht. Das Verfahren erwies sich als zuverlässig²⁾.

In den Festigkeiten kommen die hochwertigen Normenzemente heute den Tonerdezementen sehr nahe. Nur in der Anfangserhärtung bleiben sie meist stark zurück. Dennoch ist es möglich, die Anfangserhärtung der Normenzemente noch zu steigern durch Annachen mit Salzlösungen, Calciumchlorid und Aluminiumchlorid. Die hier besonders interessierende Festigkeit in den ersten 24 h der Erhärtung ist in Abb. 3 zusammengefaßt, die einerseits die starke Anfangsfestigkeit des Tonerdezementes, andererseits die Festigkeitserhöhung des Normenzementes durch Salzlösungen zeigt.

Die Wasserdichtigkeit hängt in erster Linie ab von den Zuschlagsstoffen, der Zementmenge und der Verarbeitung des Betons. Wesentliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Zementen dieser Klasse sind nicht bekannt. Es ist möglich, mit allen diesen Zementen tadellos wasserdichte Zemente herzustellen.

Die Kohlensäure wirkt lösend auf den Kalk des Betons und führt ihn in doppelkohlensauren Kalk über nach dem Schema Abb. 4. Entsprechend

²⁾ Vgl. Grün u. Köhler, Die Abbindewärme von einfachen und zusammengesetzten Zementen.

Das Molekül Wasser (H_2O) ist der Übersichtlichkeit wegen in den Formeln weggelassen.

Stadium	Angriff durch	Betonmauer			Austritt bzw. Abscheidung	Reaktionsart
		reaktionszone 1	reaktionszone 2	reaktionszone 3		
I	—	CaO	CaO	CaO	—	
II	$\text{CO}_2 \rightarrow$	CaO-CO_2	CaO	CaO	—	A
III	$\text{CO}_2 \rightarrow$	$\text{CaO(CO}_2)_2$	CaO	CaO	—	C
IV	—	—	CaO-CO_2	CaO	—	D
V	$\text{CO}_2 \rightarrow$	—	$\text{CaO(CO}_2)_2$	CaO	—	C
VI	—	—	—	$\text{CaO(CO}_2)_2$	$\text{CaO(CO}_2)_2$	D
VII	$\text{CO}_2 \rightarrow$	—	—	CaO-CO_2	$\text{CaO-CO}_2 + \text{CO}_2$	E und C
VIII	—	—	—	CaO-CO_2	$\text{CaO-CO}_2 + \text{CO}_2$	E

Formel = Die Verbindung ist wasserlöslich

Formel = " " " wasserunlöslich

CaO = Freier Kalk des Betons

CaO-CO_2 = Doppelkohlensaurer Kalk

$\text{CaO(CO}_2)_2$ = Kohlensauren Kalk

$\text{CO}_2 \rightarrow$ = Kohlensäurehaltiges Wasser

CO_2 = Gasförmige Kohlensäure

Abb. 4. Schema der Einwirkung von Wasser mit Gehalt an aggressiver Kohlensäure auf eine Talsperrenmauer (aus „Lösungserscheinungen an Beton“, R. Grün, „Der Bauingenieur“ 1930).

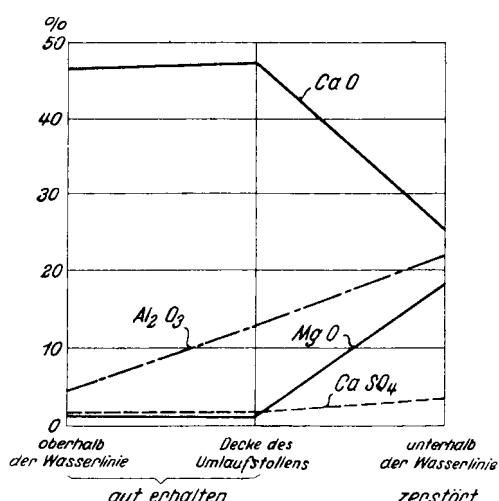


Abb. 5. Veränderung der chemischen Zusammensetzung der säure-löslichen Anteile eines Betons durch Meerwasser.

diesem Mechanismus ist der widerstandsfähigste Zement der Tonerdezement. Es folgen Zeniente mit Zumischungen geeigneter Puzzolane und schließlich die Portlandzemente. Eine Übersicht über das Verhalten der wichtigsten Zeniente wird im Teil B gegeben.

Die Sulfatbeständigkeit spielt bei Talsperren eine untergeordnete Rolle, da es nur wenig sulfathaltige Wässer gibt, die in Talsperren aufgefangen werden. Die Widerstandsfähigkeit des Tonerdezementes gegen Magnesiumsulfat, seine mangelhafte Beständigkeit bei Anwesenheit von Alkalien ist wiederholt in der letzten Zeit behandelt worden. Wesentlich besser von allen Portlandzementen bewährt sich hier unter derartigen Einwirkungen der Erzzement, der als hoch beständig betrachtet werden kann.

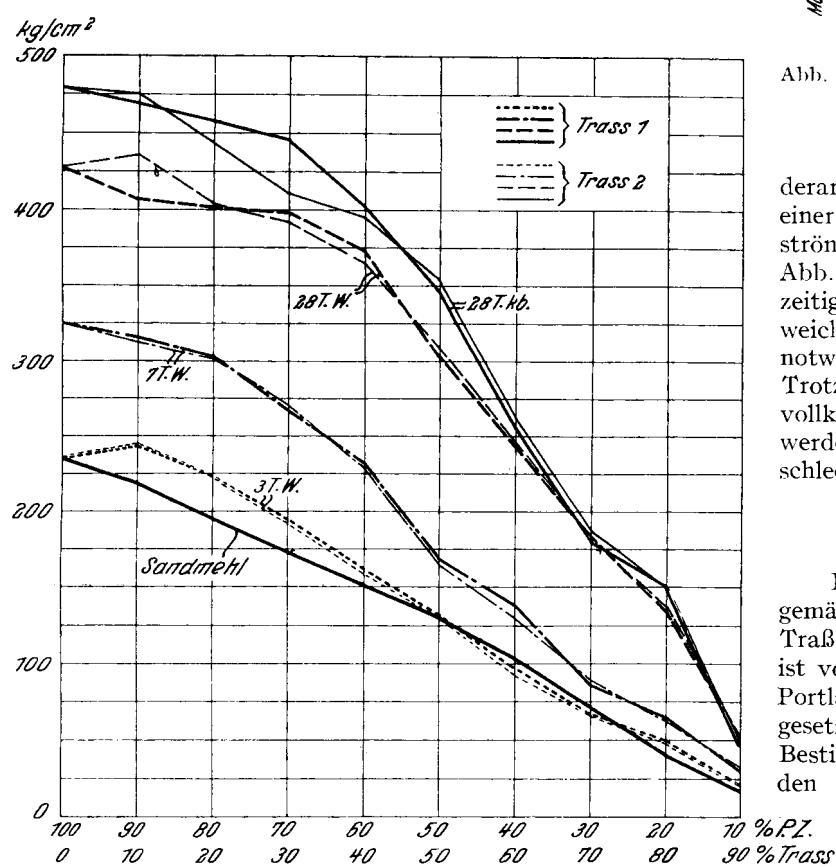


Abb. 6. Normendruckfestigkeiten von Traßzementen mit steigendem Traßgehalt.

T. W. = Tage Wasserlagerung T. kb. = Tage gemischter Lagerung.

während die Beständigkeit zu den tonerlehaltigen Zementen sinkt. Einige Einzelheiten sollen im Teil B besprochen werden.

B. Zusammengesetzte Zemente.

I. Kalk-Traß-Zemente.

Diese wurden früher meist für Vermauung von Bruchsteinen und von *Intze* für Talsperren in sehr großem Umfange verwendet. Sie haben sich auch bei guter Ausführung tadellos bewährt. Ihre Zusammensetzung war meist 1 Teil Kalkhydrat, $1\frac{1}{2}$ Teile Traß und $2\frac{1}{2}$ Teile Sand. Bei Festsitzungen konnte *Intze*³⁾ 20--30 Jahre alte Mörtelstücke vorlegen, die sich tadellos gehalten hatten. Zerstörungen durch kohlensäurehaltige Wässer sind nicht bekannt geworden, da offenbar der Traß diesem Mörtel ein vollkommen dichtes Gefüge verleiht. In Meerwasser scheinen

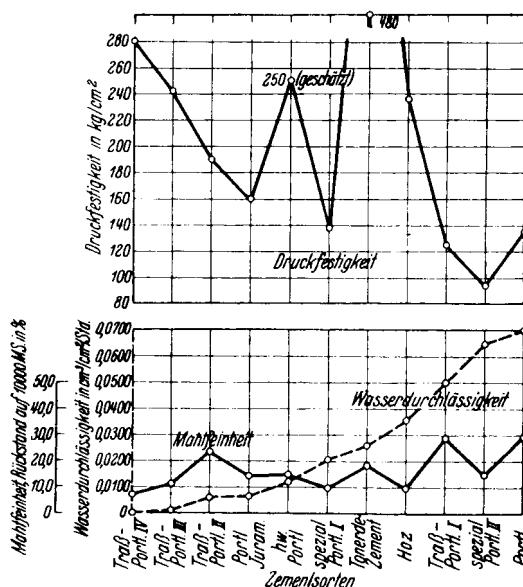


Abb. 7. Wasserdurchlässigkeit und Druckfestigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen, sowie deren Mahlfeinheit.
(Nach Vetter u. Rissel, Berlin 1933.)

derartige Mörtel weniger widerstandsfähig zu sein. Bei einer Molenmauer, die dauernd von Meerwasser durchströmt wurde, hat sich die aus dem Kurvenverlauf der Abb. 5 ersichtliche Veränderung des Mörtels unter gleichzeitiger Erweichung des Betons gezeigt, wobei die Erweichung so stark war, daß umfangreiche Reparaturarbeiten notwendig wurden, weil der Beton undicht geworden war. Trotz des vorgesetzten Klinkermauerwerks war der Mörtel vollkommen erweicht. Allerdings muß darauf hingewiesen werden, daß der in Tauchglocken eingebrachte Beton sehr schlecht gemischt und der Traß überraus grob gemahlen war.

II. Traßzement.

Die Abbindewärme der Traßzemente ist naturgemäß geringer als die des reinen Portlandzementes, da der Traß nur träge in die Erhärtung eingreift, seine Wirkung ist vor allen Dingen eine dichtende. Die Festigkeit von Portlandzement wird durch den Traßzusatz stets herabgesetzt. Aus diesem Grunde betrachten auch die Deutschen Bestimmungen für Ausführung von Betonbauten im Moor den Traß lediglich als Zuschlag und verlangen entsprechende Berechnung. Über den Grad der Herabsetzung bei Ersatz durch Traß bzw. Sandmehl gibt Abb. 6 Aufschluß.

³⁾ Vgl. Z. Ver. dtsch. Ing. **50**, 736 [1906].

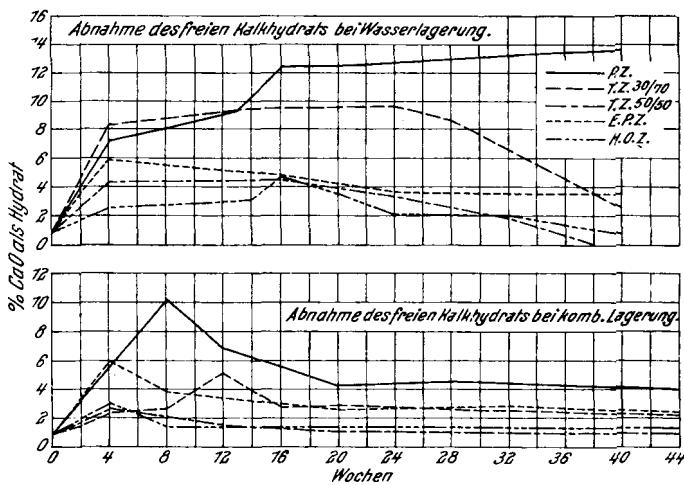


Abb. 8. Abnahme des freien Kalkhydrates bei verschiedener Lagerung der Prüfkörper.

P. Z. = Portlandzement
T. Z. 30 : 70 = Traßzement (30 Teile Traß, 70 Teile Portlandzement)
T. Z. 50 : 50 = Traßzement (50 Teile Traß, 50 Teile Portlandzement)
E. P. Z. = Eisenportlandzement
H. O. Z. = Hochofenzement.

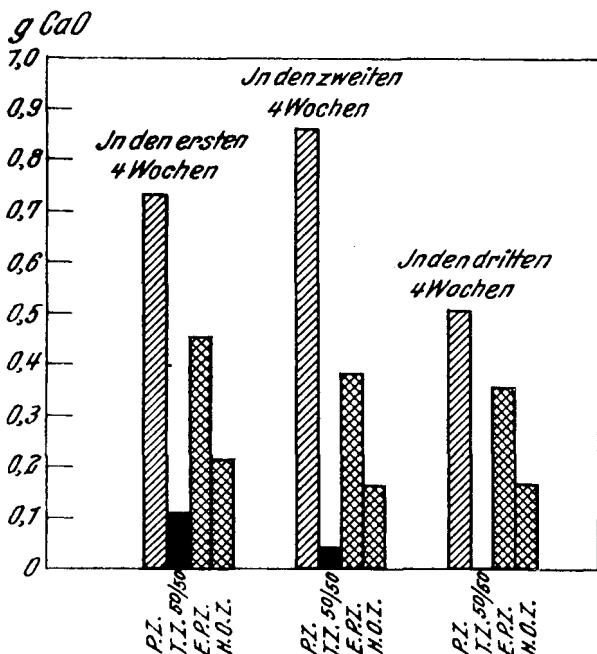


Abb. 9. Kalkauslösung durch gesättigte Gipslösung (1200 mg SO₃/l).

P. Z. = Portlandzement
T. Z. = Traßzement (50 Teile Traß, 50 Teile Portlandzement)
E. P. Z. = Eisenportlandzement
H. O. Z. = Hochofenzement

Bei Wasserdichtigkeitsprüfungen fanden Vetter und Rissel⁴⁾ (vgl. die Zahlen der Abb. 7) eine günstige Wirkung des Traßzusatzes.

Die Kohlensäurebeständigkeit wird in erster Linie erhöht durch diese dichtende Wirkung des Trasses. Im Laufe langer Erhärtung wirkt aber auch der Traß offenbar festigend auf die Bindung des Kalks. Abb. 8⁵⁾ zeigt, daß die Kalkbindung erst spät, nach ungefähr 24 Wochen, einsetzt, dann

⁴⁾ Materialauswahl für Betonbauten, Berlin 1933, S. 66.

⁵⁾ Aus „Traßzement, seine Eigenschaften und Anwendung im Bauwesen“, 2. Aufl., Kruft bei Andernach 1935.

aber allmählich zunimmt. Die Einwirkung der Gipslösung⁶⁾ geht aus Abb. 9 hervor, die gleichzeitig deutlich das verschiedene Verhalten der Mischzemente zeigt.

III. Ziegelmehlzement.

Die günstige Wirkung des Backsteinmehl auf hydraulischen Kalk war schon den Römern bekannt. Sie haben deshalb mit bestem Erfolg ihre Wasserleitung von der Eifel nach Köln durch einen Putz von Kalk und Ziegelmehl geschützt, der sich bis heute gehalten hat⁶⁾. Neuerdings machen sich wieder Bestrebungen geltend, Kaolin zu brennen und dem Zement zuzusetzen. Ein derartiger kaolinhaltiger Zement ist auch der Pansarzement. Abb. 10⁷⁾ zeigt, wie gebrühter Kaolin die Festigkeit beeinflußt, und wie die Wirksamkeit des Kaolins sich mit der Brenntemperatur ändert.

Über die Abbindewärme und Wasserdichtigkeit sowie Aggressivbeständigkeit ist wenig bekannt, günstige Wirkung erscheint aber wahrscheinlich.

IV. Gaizezement.

Dieser unter Verwendung von Gaize hergestellte Zement hat in Frankreich große Bedeutung. Seine Festigkeit

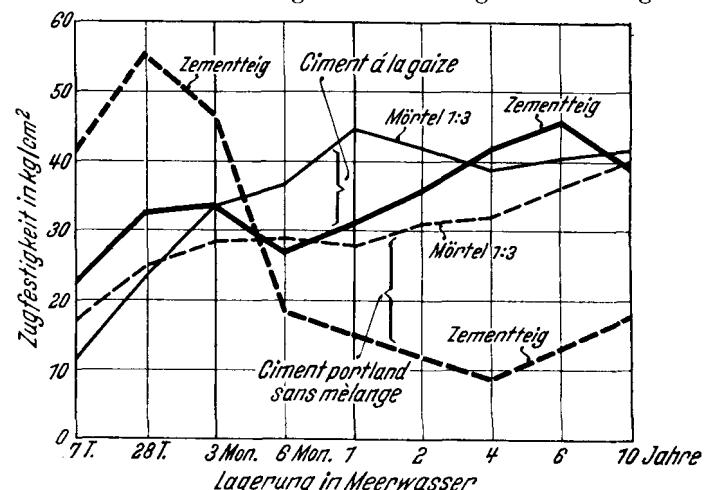


Abb. 11. Zugfestigkeitsänderung von Zement bei Lagerung in Meerwasser.

sowie seine Beständigkeit im Meerwasser geht aus Abb. 11⁸⁾ hervor; er zeigt gleiche Mörtelfestigkeit wie ein reiner Zement.

⁶⁾ Vgl. Grün, „Zusammensetzung und Beständigkeit von 1850 Jahren altem Beton“, diese Ztschr. 48, 124 [1935].

⁷⁾ Nach Prof. Kalaunder, Brünn, Diskussionsbeitrag auf dem Intern. Kongreß in Zürich 1931 zu Vortrag Grün, S. 890.

⁸⁾ Baire, Nachträglicher Bericht auf dem Intern. Kongreß in Zürich, S. 914.

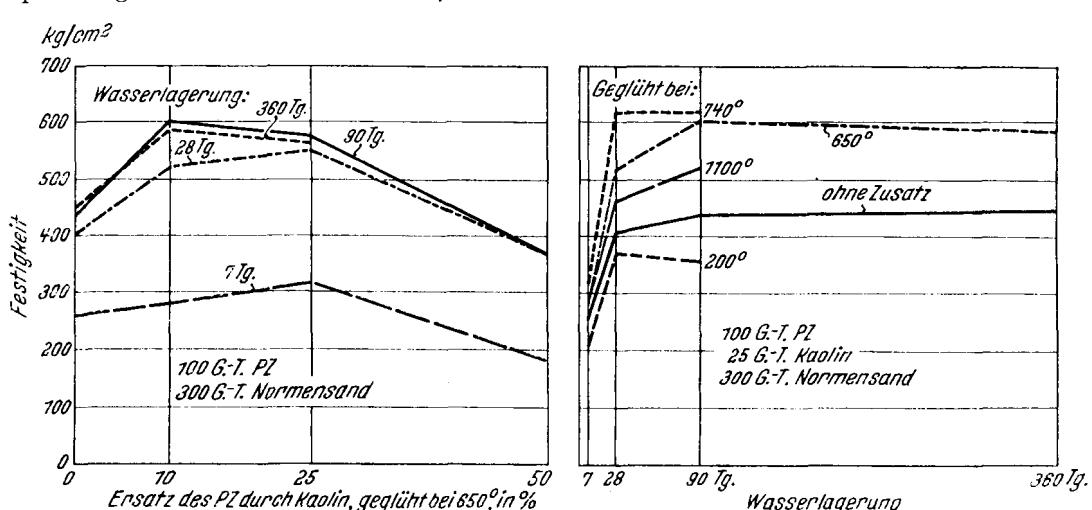


Abb. 10. Festigkeitsänderung von Zementen durch Zusatz von Kaolin.

ment, die Abbindezeit wird durch die Gaize auf das über Vierfache verlängert.

V. Molerzement.

Dieser in Dänemark unter Verwendung von Moler (einer Kieselgurart) hergestellte Zement erreicht etwas ge-

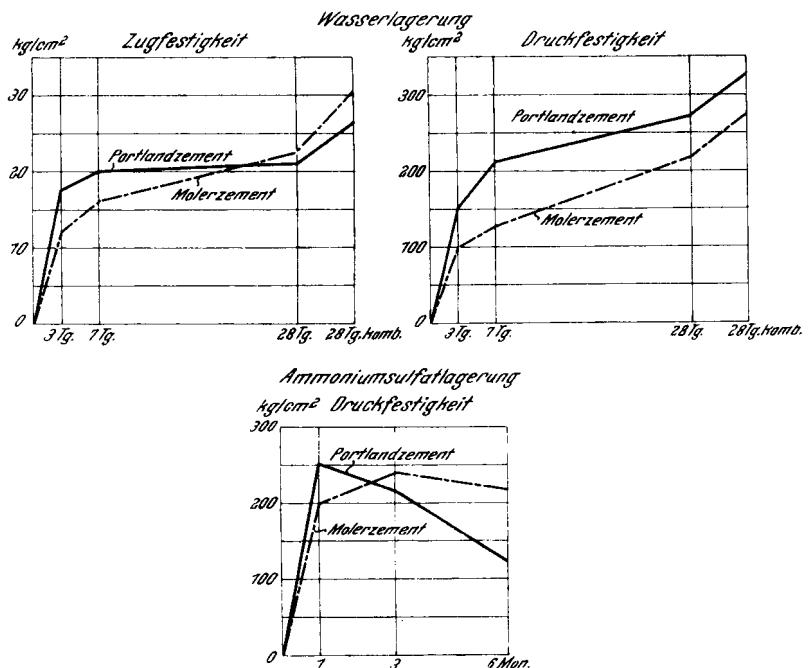


Abb. 12. Molerzement im Vergleich zu Portlandzement. 1:4 Normensand.
(Aus „Zemente mit hydraulischen Zuschlägen“,
R. Grün, Intern. Kongreß für Materialprüfung, Zürich 1932.)

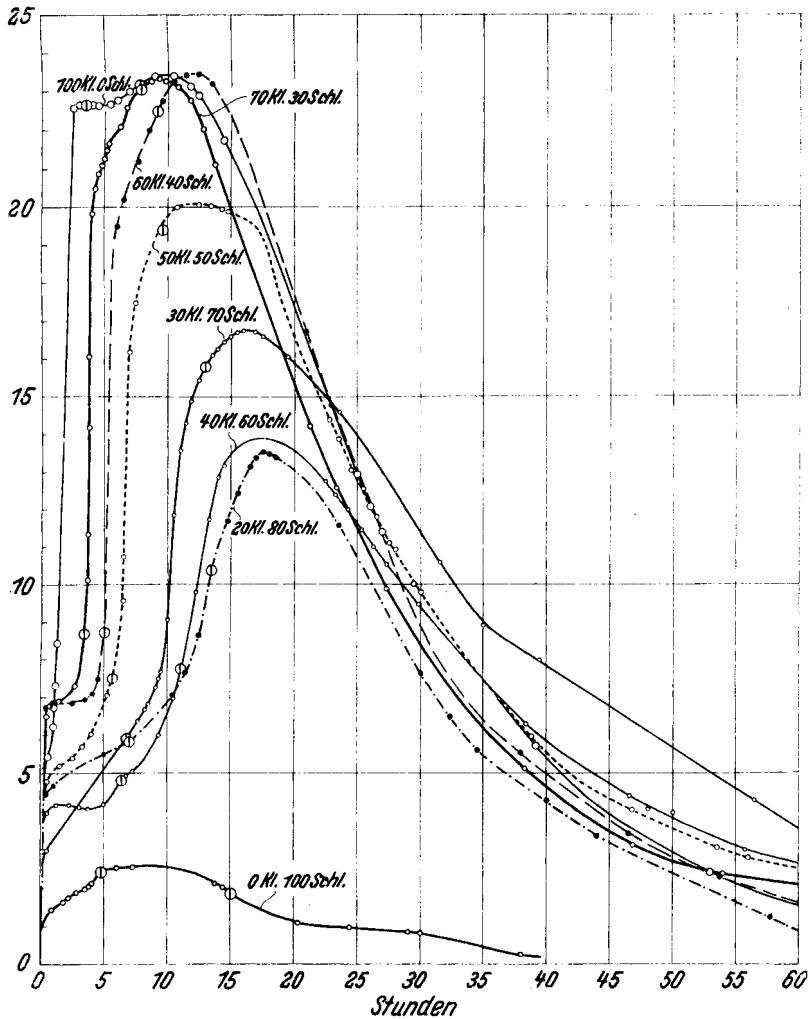


Abb. 13. Vergleichende Messungen der Erhärzungstemperaturen von Mischungen aus Portlandzementklinker und Hochofenschlacke.

ringere Festigkeiten als gewöhnlicher Portlandzement, ist aber beständiger als dieser. (Abb. 12.)

VI. Steinmehlzemente.

Als Steinmehle werden zunächst herangezogen die gewöhnlich gemahlenen von Sand, die natürlich nur dichtend wirken, ohne in die Erhärtung einzugreifen, ferner Kalksteinmehl, das bisweilen empfohlen wird. Versuche mit diesem Kalksteinmehl ergaben etwas erhöhte Festigkeiten bei geringen Zusatzmengen.

VII. Hüttenzemente.

Bei Hüttenzementen unterscheidet man solche, die auf der Baustelle hergestellt werden unter Verwendung von gemahlener Hochofenschlacke, sowie im Fabrikbetrieb aufbereitete. Zu den ersten gehörten die Zemente, die aus Thurament und Portlandzement bestehen, zu den letzteren die Normenzemente Eisenportland- und Hochofenzemente. Da grundsätzlich zwischen beiden ein Unterschied nicht besteht, können sie zusammen abgehandelt werden.

Zunächst sei vorausgeschickt, daß nach unseren Versuchen eine Vormischung des Zusatzstoffes wie Thurament oder Traß, wie diese teilweise noch amtlich vorgeschrieben ist, nicht erforderlich erscheint. Es zeigte sich kein Unterschied in der Festigkeit zwischen dem Beton bei gemeinsamer und bei getrennter und zeitlich verschiedener Aufgabe von Zement und Traß, wie aus Tabelle 1 hervorgeht.

Die Abbindewärme des Portlandzementes läßt sich durch Zusatz geeigneter Hochofenschlacke weitgehend herabsetzen. Abb. 13 zeigt an Temperaturkurven die diesbezüglichen Verhältnisse sehr deutlich. In der Praxis haben allerdings manche Hüttenzemente trotz dieser tatsächlichen Verhältnisse ähnliche Abbindewärmen wie der Portlandzement, weil zurzeit bei Herstellung dieser Zemente auf hohe Festigkeit gesehen und deshalb die Mahlfeinheit sehr weit und der Klinkerzusatz bis zu 50% hinaufgetrieben werden. Bei Anforderung von geringerer Abbindewärme sind demgemäß die liefernden Werke auf diese aufmerksam zu machen. Bei Messung in der Praxis ergaben sich bei verschiedenen Meßtiefen verschiedene hohe Betontemperaturen, die i. allg. bei Hochofenzement geringer waren als bei Portlandzement⁹⁾. Bei Verwendung von Portlandzement zeigte der Beton eine Temperatursteigerung bis 25° gegenüber der Außenluft, gemessen im Innern des Betonkörpers in 2 m Abstand von der Außenfläche (vgl. die dem Werk von Gaye entnommene Abb. 14). Ähnliche Temperaturen wurden beim Bau der Gatun-Schleuse des Panama-Kanals und der Schiffsschleuse Ymuiden beobachtet¹⁰⁾. Bei Hochofenzement betrug die entsprechende Steigerung nur 15—20°. Die absolute Höchststeigerung betrug bei Portlandzement 45°, bei Hochofenzement 25°. Die Steigerung der Temperatur im Innern des Bauwerkes führte Ringers dazu¹¹⁾, Festigkeitsversuche mit Beton zu machen, den er einerseits in einem Ofen, andererseits im Freien erhärten ließ, um auf diese Weise festzustellen, ob die Erwärmung im Bauwerk die Festigkeit schädigte. Abb. 15 zeigt, daß solche Schädigungen nicht eintreten. Bei Messungen von Agatz¹²⁾ ergaben sich bei 3 Zementen

⁹⁾ Vgl. Gaye, Der Gussbeton, Berlin 1926, S. 163 ff.

¹⁰⁾ Vgl. Ringers u. Peiser, Der Bau der Schiffsschleuse in Ymuiden.

¹¹⁾ Vgl. „De Ingenieur“ Nr. 42 vom 17. Oktober 1925.

¹²⁾ Rationelle Bewirtschaftung des Betons, Berlin 1927.

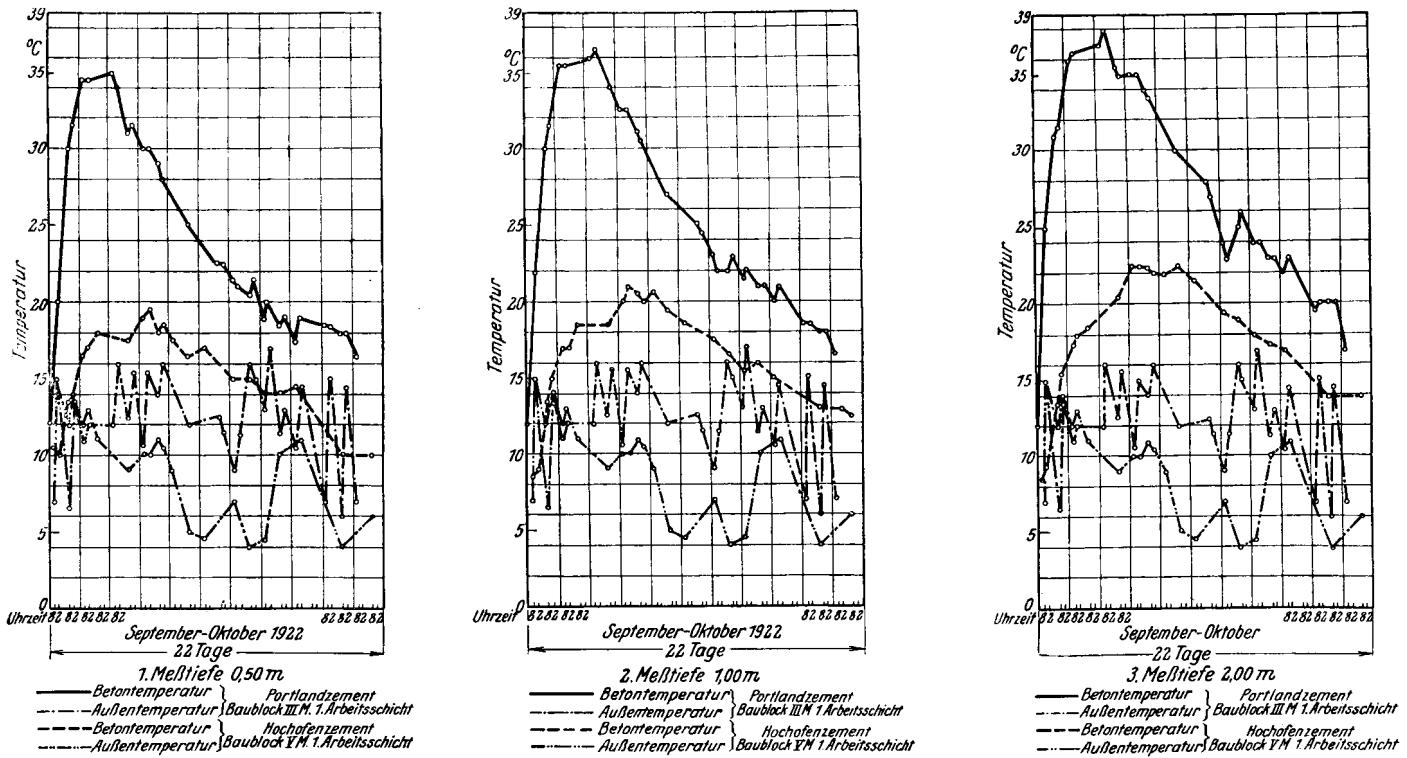


Abb. 14. Abbindewärme des Gußbetons. (Aus Gaye, Der Gußbeton, Berlin 1926, Verlag von Wilh. Ernst & Sohn.)

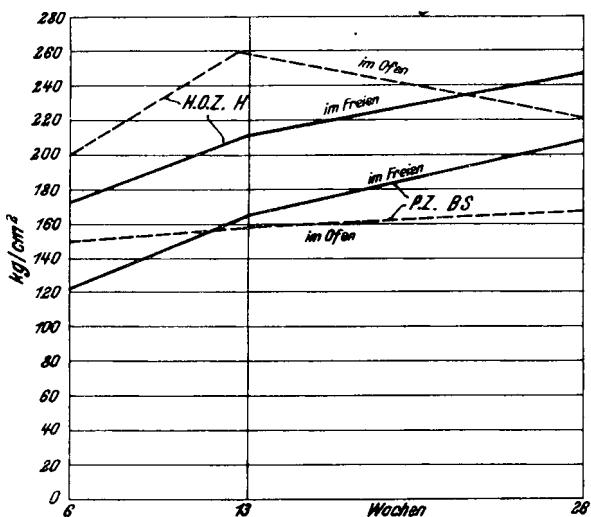


Abb. 15. Vergleich der Festigkeiten von Zement im Freien und in einem Muffelofen zur Prüfung des Einflusses der Abbindewärme (nach Ringers).

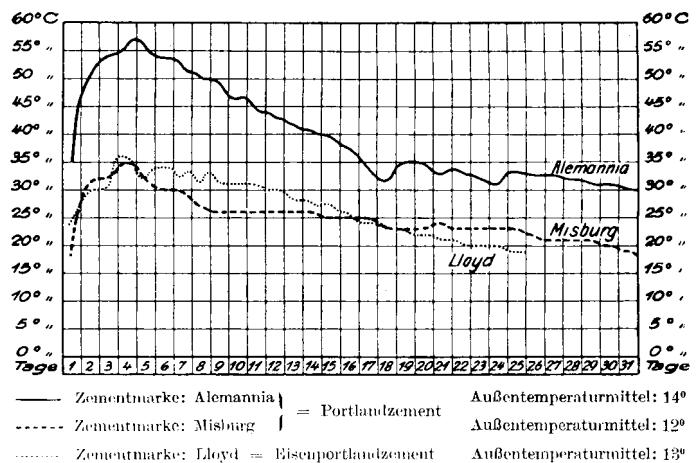


Abb. 16. Verlauf der Temperaturkurven im Bauwerk.

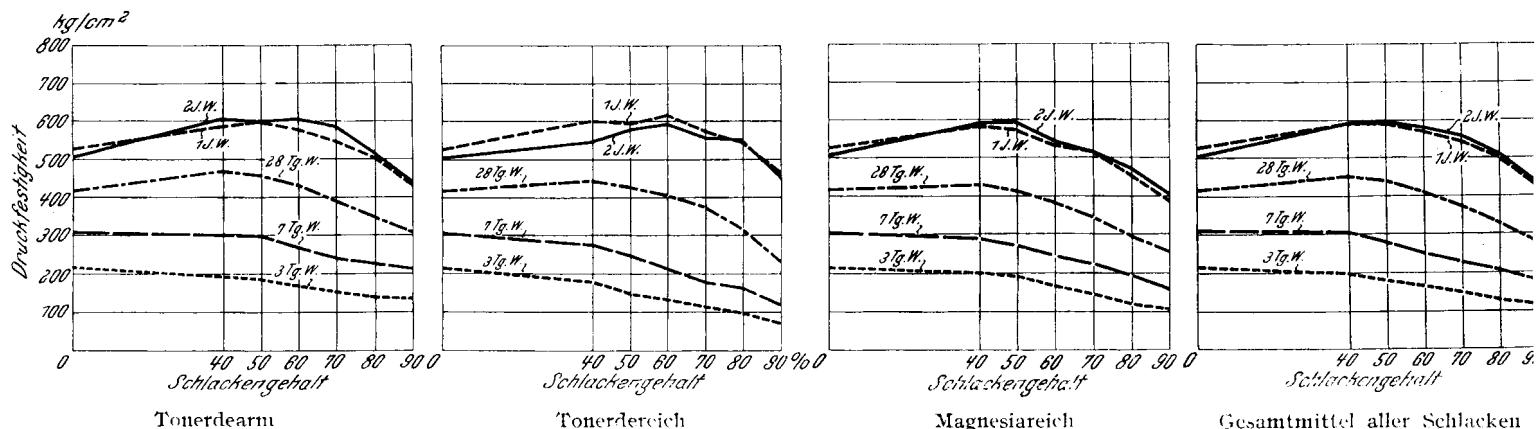


Abb. 17. Festigkeitsveränderung von Portlandzementklinker durch Zumahlung von Hochofenschlacke bis zu 90% Hochofenschlacke bei 10% Klinkergehalt. Gegenüberstellung der verschiedenen Schläcken, tonerdearm, tonerdreich usw. Erhärtung nach 3, 7 und 28 Tagen, 1 und 2 Jahren.

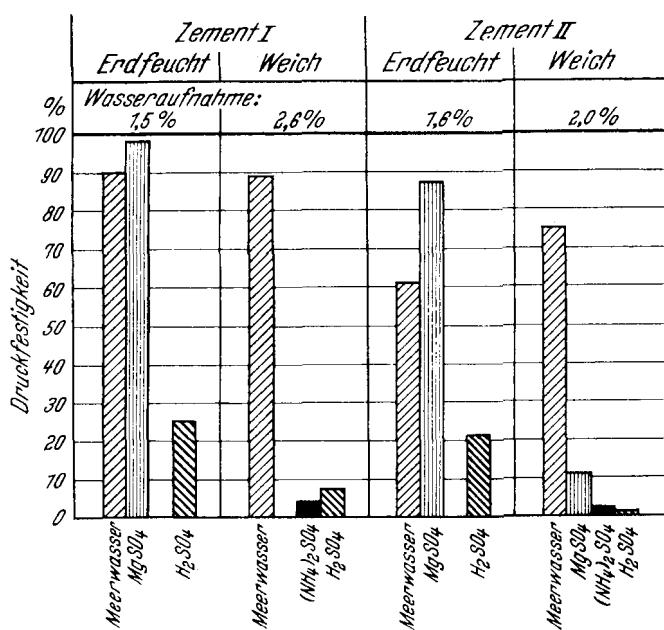


Abb. 18. Aggressive Einwirkung auf ganz besonders dichte und stark verdichtete Betone mit sehr geringer Wasseraufnahme von 1,5 und 2,6%. Druckfestigkeit der Prüfkörper aus Beton nach zweijähriger Lagerung in Meerwasser, MgSO_4^- , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4^-$ und H_2SO_4 -Lösungen in % der Festigkeit bei gleichlanger Lagerung in Leitungswasser.

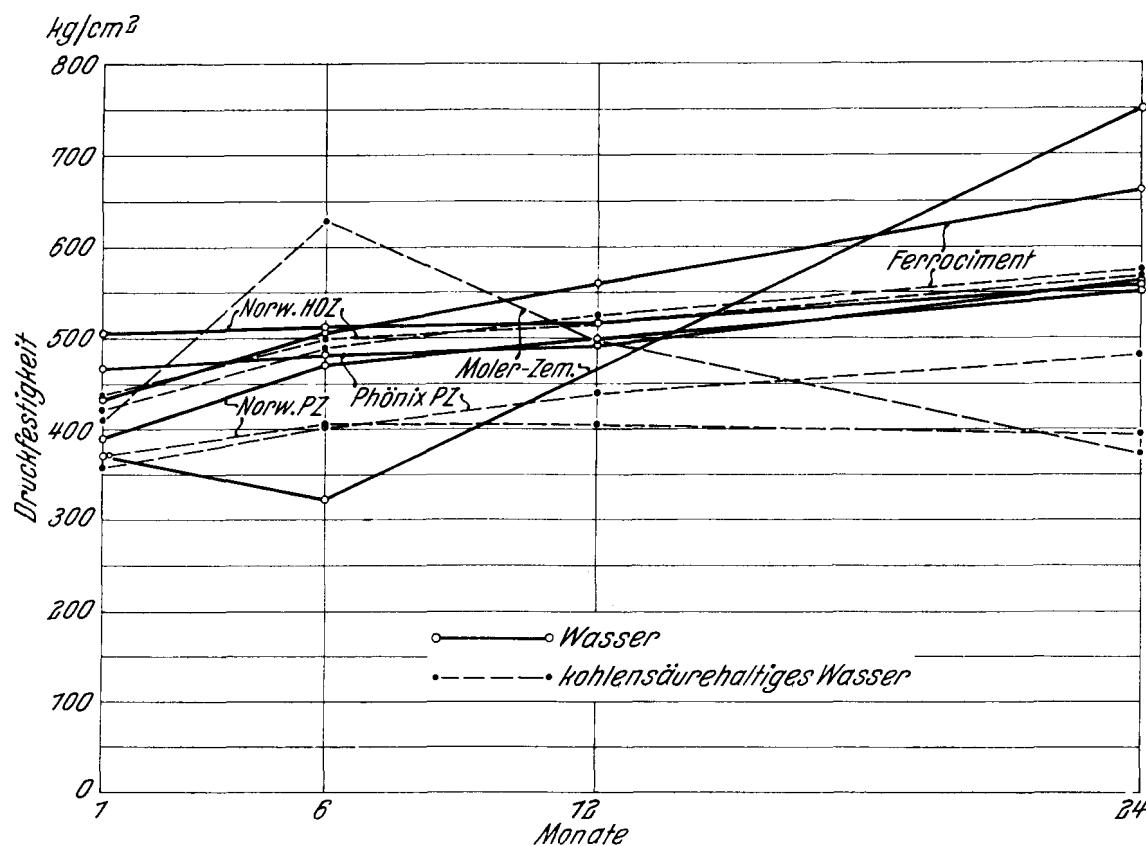


Abb. 19. Wirkung von kohlensäurehaltigem Wasser auf verschiedene Zemente (im Labor).

die Zahlen der Abb. 16, die deutlich das verschiedene Verhalten der verschiedenen Zementmarken zeigt.

Der Festigkeitsverlauf hochfenschlackenhaltiger Zemente ist für die verschiedenen Schlacken verschieden. Im allgemeinen fällt die Festigkeit bei Zusatz saurer Schlacken mit steigendem Zusatz, auch bei mehr basischen Schlacken tritt bei hohem Zusatz eine Festigkeitsverminde rung ein (Abb. 17).

Die Wasserdichtigkeit ist i. allg. bei fein gemahlenen Zementen größer als bei gröberen, wird aber endgültig

weniger durch die Zementart als vor allen Dingen durch die Zuschlagsstoffe und die Verarbeitungsweise beeinflusst¹³⁾. Daß die Dichtigkeit nicht allein ausschlaggebend ist, zeigt die Zerstörung von überaus dicht hergestellten Körpern in aggressiven Wässern (Abb. 18), weiter das in der Praxis tatsächlich beobachtete Zerfallen von Beton trotz geringer Wasseraufnahme.

Die Kohlensäurebeständigkeit spielt bei Zerstörung von Beton und bei Verarbeitung von Natursteinen eine viel größere Rolle als gemeinhin angenommen wird. Der Kohlensäuregehalt des Regenwassers ist viel höher als allgemein bekannt ist. Bei Versuchen am Turm der Herz-Jesu-Kirche in Düsseldorf wurden folgende Zahlen festgestellt^{13a)}:

Entnahmestelle	Höhe m	SO_3 mg/l	CO_2 aggr.	pH -Wert
1. Ebene Erde		15,6	22,0	6,4
2. Fenster unter Turmuhr, Westseite	20	13,7	15,4	6,4
3. Balkon, Westseite	40	57,6	19,8	6,4
4. Balkon, Ostseite	40	144,0	22,0	6,4
5. Fiale, wo der Helm beginnt, Westseite	60	52,1	22,0	6,4
6. Unter der Turmspitze	80	140,0	24,0	6,4

Bei Laboratoriumsversuchen wurden Normenwürfel in ein 95 l fassendes Gefäß gestellt, in welchem ständig

5 l Wasser erneuert wurden. Zur Erneuerung diente ein Glasballon mit kohlensäure-angereichertem Wasser. Die Anreicherung erfolgte durch Einleiten der Kohlensäure durch eine Filterkerze. Auch in das Lagerungsgefäß wurde

¹³⁾ Vgl. Versuche über Wasserdichtigkeit von Zement und Beton, Heft 65 des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton, 1931, S. 22, und Walz, Die heutige Erkenntnis über Wasserdichte des Mörtels und Betons, Berlin 1931.

^{13a)} R. Grün, Die Verwitterung der Bausteine vom chemischen Standpunkt, Chemiker-Ztg. 57, 401 [1933].

Tabelle 1. Druckfestigkeit von Zement-Traß-Beton

aus 1 Teil Zement + 0,3 Teilen Traß + 5 Teilen Kiesand + 8,5% Wasser bei verschiedener Mischungsart
(Mittel aus 2 Versuchsreihen mit 2 verschiedenen Zementen. Unveröffentlichte Versuche von Grün und Beckmann, Düsseldorf 1932.)

Mischzeit	Alter des Betons bei der Prüfung Tage	Mischungsart				
		I Zement und Traß in der Kugelmühle vorgemischt	II Zement, Traß und Kies gleichzeitig dem Betonmischer aufgegeben	III Zement und Kies gleichzeitig aufgegeben, Traß nach $\frac{1}{3}$ Mischzeit zugesetzt	IV Traß und Kies gleichzeitig aufgegeben, Zement nach $\frac{1}{3}$ Mischzeit zugesetzt	V Zement und Traß gleichzeitig aufgegeben, Kies nach $\frac{1}{3}$ Mischzeit zugesetzt
90 sec	3	69	71	72	61	72
	7	132	126	127	128	126
120 sec	3	69	68	64	65	65
	7	122	127	123	130	125

Tabelle 2. Veränderung kohlensäure-aggressiven Wassers beim Durchtritt durch Beton.

	Aggertalsperre (HOZ)				Kallbachstollen (PZ u. HOZ)				Diemelsee (PZ)					
	27. Februar 1930 in der Mauer				7. Dezember 1933				7. Dez. 1933		18. Mai 1934			
	Stau- bek- ken	Fuge	Soh- len- drä- nage	Schwitz- wasser Begeh. St.	Kelt- zer- bach Oberfl.	gefaß- te*)	Sicker- wasser Quelle 4590	Torkr. haut 200	Stol- len- pass. 2640	Stol- len- quelle 3530	See	Drä- nage	See	Drä- nage
R ₂ O ₃	8,0	2,0	13,0	7,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	78,0	81,6	52,0	56,2
CaO	12,0	29,0	21,0	70,0	12,0	21,0	31,0	30,0	29,0	29,0	41,0	20,0	20,0	0
MgO	5,8	1,0	4,0	2,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	14,5	5,1	Sp.	0
SO ₃	2,7	8,6	9,3	20,6	1,4	3,4	6,9	1,4	19,2	8,9	12,51	12,3	5,5	6,9
agrgr. CO ₂	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	6,6	26,4	6,6	0	33,0	6,6	0	0	8,8	0
K ₂ O													4,35	
pH-Wert	6,8	6,9	6,8	über 9	6,1	6,1	6,3	6,1	5,9	6,2	6,0	über 9	6,4	über 9

	Bleilochsperrre (Thurament)			Schluchseesperre (HOZ)				Schwarzasperre				
	30. Mai 1934			6. März 1935		16. Oktober 1935		16. Oktober 1935		6. März 1935		
	Stausee	Sicker- wasser	Glührückstand	See	Sicker- wasser	Unter- druckrohr	See	in der Mauer links	rechts	in der Mauer	rechter Hang	
R ₂ O ₃	66,0	111,0		7,0	10,0	16,0	2,0	2,0	8,0	6,0	2,0	13,0
CaO	36,0	36,0		12,0	113,0	186,0	10,0	64,0	50,0	14,0	30,0	32,0
MgO	n. b.	n. b.		6,5	2,9	3,3	4,3	0,7	2,1	3,6	2,9	5,8
SO ₃	3,7	19,9		0,2	0,7	2,7	0,69	3,4	2,7	0,69	1,37	0,7
agrgr. CO ₂	17,6	8,8		8,8	0	0	8,8	0	0	11,0	0	0
pH-Wert	6,7	7,2		7,3	9,3	9,7	7,1	8,9	8,8	7,3	9,3	9,0

*) In der Nähe zerstörten und wieder ausgebesserten Betons.

**) Beton weggewaschen.

Tabelle 4. Starke Veränderung von P. Z.-Beton durch kohlensäure-aggressives Wasser an einer norwegischen Talsperre (Rølfsen).

Probe	Lösl. SiO ₂	R ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Rest
Heutiger Portlandzement						
1. Guter Beton (1914)	21,0	9,0	65,0	3,0	1,0	1,0
2. Beton, etwas angegriffen (1914)	19,4	8,3	59,2	10,2	1,9	1,1
3. Beton, angegriffen (1914)	22,2	9,1	56,6	11,0	1,1	—
	32,3	13,8	40,0	12,3	Sp.	1,6

Tabelle 3.**Geringe Veränderung von Beton durch kohlensäure-aggressives Wasser (Thuramentbeton).**

	außen	Platte Mitte	innen	Betonkörper 13 Kern Bindemittel
SiO ₂	26,7	25,6	25,2	24,0
Al ₂ O ₃	12,0	12,1	13,4	14,3
Fe ₂ O ₃	4,3	3,9	3,2	2,1
MnO	0,8	0,7	0,8	0,4
CaO	41,3	44,5	43,5	44,1
MgO	8,8	8,1	8,4	10,4
CaS	1,3	0,9	2,4	1,8
CaSO ₄	4,8	4,2	3,1	2,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabelle 5. CO₂-Gehalt von Beton.

	Sperre	Kraft- haus	Schieber- bahn	Brücke	Burgk- hammer
Außen	5,9	2,1	5,5	3,6	4,6
Mitte	2,1	—	—	—	—
Innen	3,0	2,1	1,7	2,3	2,1
Kern	0,9	1,6	1,4	1,8	1,6

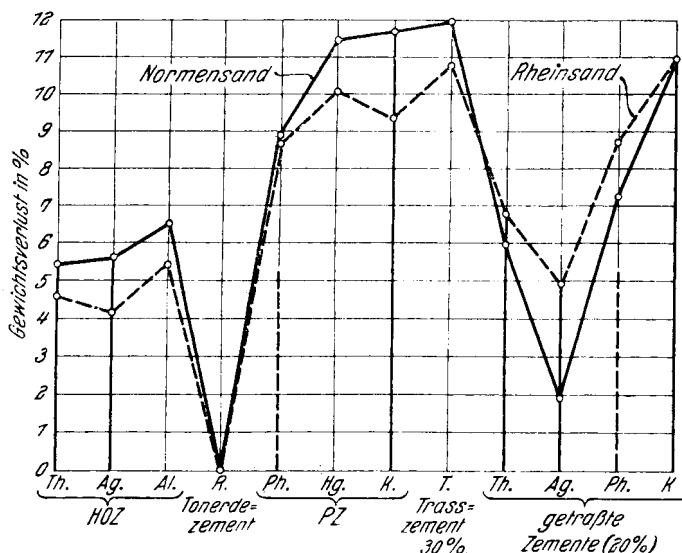


Abb. 20. Gewichtsverlust von in kohlensäurehaltigem Wasser (300 mg CO₂/l) während 5 Jahren gelagerten Körpern nach dem Abbürsten.

dauernd Kohlensäure eingelassen, so daß in dem Glasballon der Gehalt an aggressiver Kohlensäure 254 mg/l, im Lagerungsgefäß selbst 286 mg/l betrug. Geprüft wurden bei dem Verfahren Molerzement, einige Portlandzemente und einige Hochofenzemente (Abb. 19). Da dieses Verfahren nicht nur kostspielig war, sondern auch in seinen Strömungsverhältnissen der Praxis nicht genügend entsprach, wurden in den städtischen Pumpbrunnen der Stadt Bonn, durch welchen täglich viele 1000 m³ Wasser hindurchströmten, Lattenkästen eingehängt, in denen sich Druckkörper befanden. Nach 5jähriger Versuchsdauer ergaben sich die Zahlen der Abb. 20 und 21. Bemerkenswert ist das ausgezeichnete Verhalten des Tonerdezementes.

Sehr bemerkenswert sind Untersuchungen von kohlensäurehaltigen Wässern, die Talsperren durchdrungen haben, da aus der Untersuchung derartiger Wässer ohne weiteres auf den Mechanismus der Zerstörung geschlossen werden kann. Tabelle 2 beweist die Tatsache, daß bei derartigen Durchströmungen wirklich Kalk aufgelöst und an anderer Stelle wieder abgeschieden wird. Die Kalkverarmung des Betons selbst geht aus Tabelle 3 und 4 hervor, während die Anreicherung mit CO₂, also die Carbonisierung, in Tabelle 5 gezeigt ist. In der Praxis hat sich in Norwegen der Kraakosendamm, soweit er aus Eisenportlandzement hergestellt war, besser verhalten¹⁴⁾.

Daß die Verschiedenheit der Schlacke auch verschieden auf die Sulfatbeständigkeit wirkt, ist wiederholt nachgewiesen (Abb. 22), es ist also stets die Art der Schlacke zu berücksichtigen. Im Trockendock von Helgoland waren die unter hohem Druck stehenden Wände von Portlandzement mit einer dicken Schicht von Ausblühungen überzogen, die aus Sulfat und kohlensaurem Kalk bestanden; die aus Hochofenzement hergestellten Wände waren wesentlich weniger stark ausgewaschen. Im allgemeinen hält sich auch der Hüttenzementbeton besser als der Portlandzementbeton¹⁵⁾.

¹⁴⁾ Vgl. Eisenportlandzement, Taschenbuch über die Erzeugung und Verwendung des Eisenportlandzementes, 1928, S. 112.

¹⁵⁾ Vgl. Grün, Der Beton, Berlin 1926, S. 131, und Ministerieller Erlaß vom 24. Mai 1924 bezügl. Zulassung des Hochofen-

Nach den Untersuchungen von Dumesnil¹⁶⁾ ist die Zerstörung des Tricalciumaluminats die Hauptursache für die Verminderung der Festigkeit, da der freie Kalk als solcher zur Erhärtung des Betons nicht beiträgt und deshalb Hüttenzemente mit hohem Schlackengehalt nach dem Erhärten besonders widerstandsfähig sind, da sie kein Tricalciumaluminat enthalten. Auch die Schwindung ist nach Angabe des gleichen Autors geringer und fällt mit steigendem Schlackengehalt. Auch Feret kommt in seiner grundlegenden Arbeit¹⁷⁾ nach einjährigen Versuchen zu dem Ergebnis, daß Portlandzement einen höheren Gehalt an auslaugbarem Kalk enthält als die Puzzolanzemente (Abb. 23).

VIII. Kieselgur- und Si-Stoff-Zemente.

Verschiedene Zusätze, wie Kieselgur und Si-Stoff, werden wiederholt verwendet. Zur Kieselgur-Zumischung in geringen Mengen von 2–3% ist man neuerdings in Schweden und Norwegen übergegangen, um den Zementmörtel plastischer zu machen. Bei Versuchen von Schnetter über die Einwirkung von Kieselgur und Si-Stoff auf Hochofenzement ergaben sich die Normenfestigkeiten der Tabelle 6, die keine ungünstige Beeinflussung durch die Zusätze anzeigen, sie also stets für bestimmte Zwecke, Erhöhung der Plastizität und Wasserdichtigkeit, als zu-

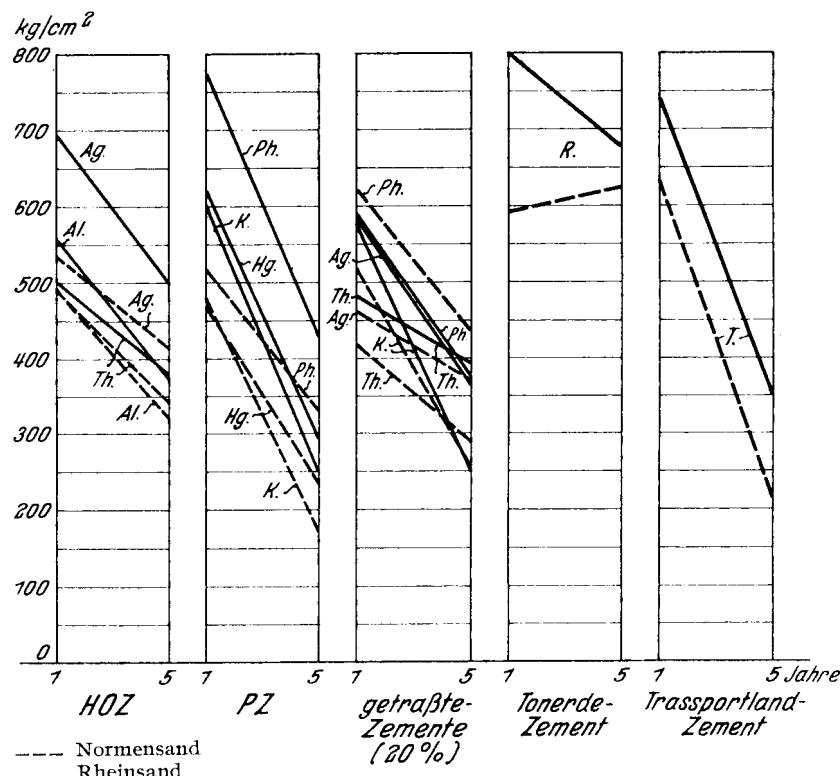


Abb. 21. Druckfestigkeitsabnahme der 5 Jahre in Bonn gelagerten Zemente gegenüber einjähriger Lagerung in Regenwasser.

lässig erscheinen läßt. Beton aus Hochofenzement mit 5% Kieselgur zeigt bei praktisch gleicher Druckfestigkeit eine etwas geringere Biegefestigkeit als bei Verwendung von zusatzfreiem oder traß- und sandmehlhaltigen Hochofenzement. Auch die Schwindung wird durch Verwendung von Kieselgur etwas verstärkt. (Vgl. Tabelle 6.)

zementes als Normenzement. Es heißt hier: „Gegen chemische Einflüsse erwies sich der Hochofenzement widerstandsfähiger als der Portlandzement“.

¹⁶⁾ Les Ciments à base de laitier granulé de hauts fournaux.

¹⁷⁾ Additions de matières pulvérulentes aux liants hydrauliques, Paris 1926, Tab. 32.

Tabelle 6.
Konsistenz, Festigkeit und Schwindung von Beton aus Hochofenzement mit Kieselgur-, Traß- und Sandmehlzusatz

(1 Teil Zement + 6 Teile Rheinkiessand + 7,5% Wasser)
(Unveröffentlichte Versuche a. d. Forsch.-Inst. d. Hüttenzementind.)

		I	II	III	IV
Zusammensetzung des Zementes	Hochofenzement	100	95	95	95
	Kieselgur	—	5	—	—
	Traß	—	—	5	—
	Sandmehl	—	—	—	5
Eigenschaften des Betons	Setzmaß, cm	12	6	10	12
	Biegefestigkeit nach 45 Tagen kg/cm ²	49	46	49	51
	Druckfestigkeit nach 45 Tagen kg/cm ²	226	220	261	260
	Schwindung 28 Tagen μ/m nach 56 Tagen	225	236	206	131
		270	311	262	205

IX. Vereinigung verschiedener Puzzolane.

Oben ist schon gezeigt, daß auch eine Vereinigung verschiedener Puzzolane und Steinmehle durchaus möglich

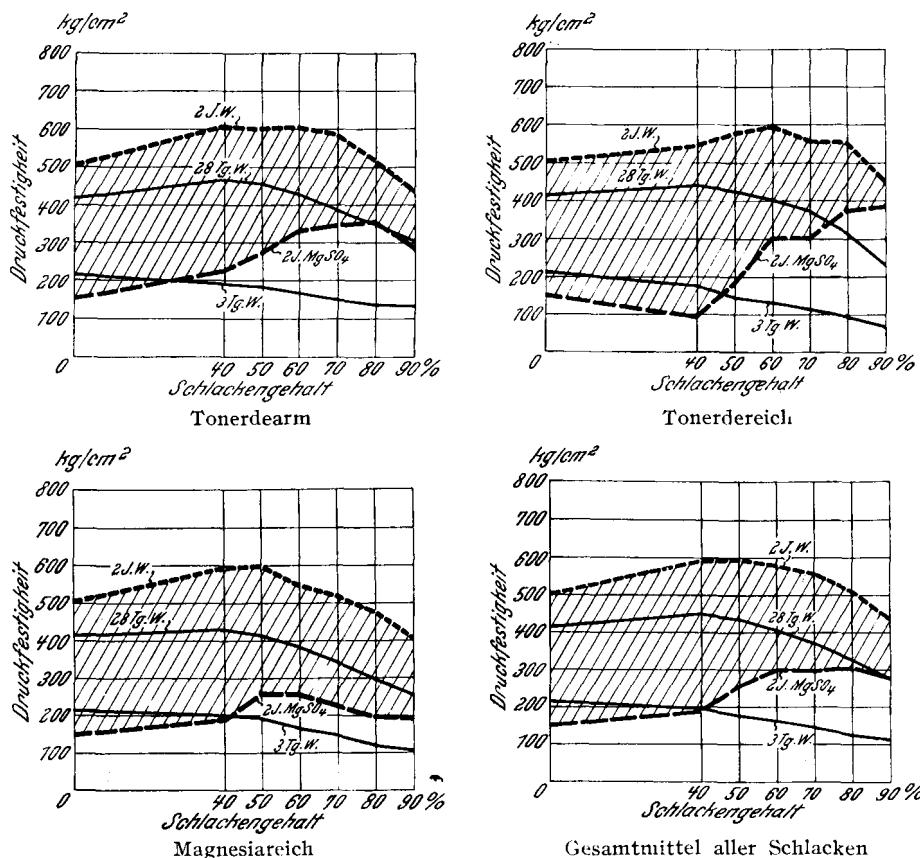


Abb. 22. Vergleich des Verhaltens von Portlandzement und Hochofenzement mit verschiedenem Schlackengehalt (bis zu 90%) bei Wasser- und Magnesiumsulfatlagerung: das gestrichelte Feld zeigt die Verschiedenheit bei Wasser- und Magnesiumsulfatlagerung, sein Kleinerwerden nach rechts also die geringere Schädigung der stark hochofenschlackenhaltigen Zemente.
(Aus Grün, Zemente mit hydraul. Zuschlägen, Intern. Kongreß Zürich, 1932.)

ist. Die meist gebräuchliche ist diejenige von Hochofenschlacke und Traß. Diese wurde z. B. verwendet bei der Herstellung der Staustufe Edersheim, bei welcher Hochofenschlacke und Traß (0,25 Traß) zusammengenommen wurden, so daß also mit einem Mischungsverhältnis 30 Portlandzement, 70 Hochofenschlacke und 25 Traß gearbeitet wurde. Die gefundenen Festigkeiten sind stets befriedigend¹⁸⁾.

¹⁸⁾ Vgl. Tabelle III in „Baustoff und Anlage zur Herstellung des Betons für die Bauten der Staustufe Edersheim“ von Dipl.-Ing. Höland, Edersheim, Die Bautechnik 1934, Heft 48.

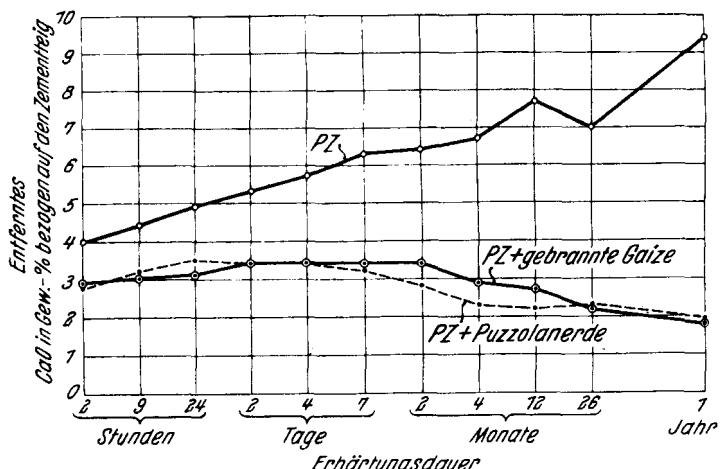


Abb. 23. Kalklösung durch Zuckerwasser aus Zementteig (Feret).

Bei Laboratoriumsversuchen über den Einfluß von Steinmehlzusätzen, wie z. B. Kalksteinmehl und gepulverte Stückschlacke sowie Traß zu Hochofenzement, auf die Eigenschaften des aus solchen Zementen hergestellten Betons ergaben sich die in Tabelle 7 aufgeführten Zahlen.

Das Kalksteinmehl erhöht ohne Zweifel die Wasserdichtigkeit des Betons und verbessert seine Verarbeitbarkeit. Diesen Vorteilen gegenüber wird aber die Betonbiegefestigkeit deutlich geschädigt und die Schwindung verstärkt. Durch Zusatz von Stückschlacke wurde ebenfalls die Biegefestigkeit gedrückt und die Wasserdurchlässigkeit erhöht. Bei höheren Zusatz von Stückschlacke wird der Beton allerdings wieder dichter. Eindeutig von Vorteil auf die Festigkeit und Dichtigkeit des Betons ist lediglich ein Zusatz von Traß zu Hochofenzement in geringen Mengen von etwa 10%.

Da in einem derartigen Zement die Hochofenschlacke selbst die Rolle der Erhöhung der Aggressivbeständigkeit durch die Wechselwirkung Portlandzementklinker und Hochofenschlacke, der Traßanteil dagegen die Erhöhung der Verarbeitbarkeit und Wasserdichtigkeit übernimmt, sind derartige Zemente durchaus empfehlenswert und stellen bis zu einem gewissen Grade Idealzemente dar, deren Herstellung in der Fabrik durchaus erwogen werden sollte. Das Mischungsverhältnis für einen derartigen Fabrikzement würde betragen:

25% Portlandzement, 10% Traß, 3% Gips und 62% Hochofenschlacke.

Bei reaktionsfähigen Schlacken kann der Hochofenschlackengehalt noch erhöht werden, da es nicht auf die Festigkeit, sondern auf die Aggressivbeständigkeit ankommt.

Zusammenfassung.

Als Spezialzemente für Talsperren u. dgl. kommen einfache Zemente, also Portlandzemente besonderer Fertigung (kieselsäurerreiche und tonerdearme), Erzzemente sowie Tonerdezemente in Frage. Von diesen haben die kieselsäuerreichen und die Erzzemente eine etwas geringere Abbindewärme als gewöhnlicher Portlandzement, aber naturgemäß eine höhere als alle diejenigen Zemente, denen eine Puzzolane zugesetzt ist, sie bleiben weit hinter den

Tabelle 7. Konsistenz, Festigkeit, Schwindung und Wasserdurchlässigkeit von Beton aus Hochofenzement mit Zumahlungen von Traß, Kalkstein und Stückschlacke (1 Teil Zement + 6,2 Teile Rheinkiessand + 9% Wasser).
(Unveröffentlichte Versuche von Grün u. Beckmann im Forschungsinstitut der Hüttenzement-Industrie 1935.)

		I	II	III	IV	V	VI	VII
Zusammensetzung der Zemente	Zementklinker	25	25	25	25	25	25	25
	Granulierte Hochofenschlacke	75	65	55	65	55	65	55
	Trass	—	10	20	—	—	—	—
	Kalkstein	—	—	—	10	20	—	—
Eigenschaften des Betons	Stückschlacke	—	—	—	—	—	10	20
	Gipsstein	3	3	3	3	3	3	3
	Ausbreitmasse, cm	53	49	48	50	49	51	51
	Biegefestigkeit nach 60 Tagen, kg/cm ²	37	37	27	28	25	23	23
	Druckfestigkeit nach 60 Tagen, kg/cm ²	207	288	238	232	214	207	220
	Schwindung nach 28 Tagen, μ/m	156	104	155	210	251	240	211
	Schwindung nach 56 Tagen, μ/m	226	250	250	325	293	274	258
	Wasserdurchlässigkeit bei 4,5 at Wasserdruk cm ³ in 2 Tagen	225	28	210	48	103	630	350

Tonerdezementen zurück. In den Festigkeiten sind die Tonerdezemente besonders in der Anfangserhärtung weit überlegen. Die Anfangserhärtung der Spezialzemente lässt sich aber durch Salzzusatz stark erhöhen. In der Wasserdichtigkeit sind wesentliche Unterschiede nicht vorhanden, da diese insbesondere von den Zuschlagsstoffen, der Zementmenge und der Verarbeitungsart abhängt. Als besonders kohlensäurebeständig erwiesen sich die Tonerdezemente, während bei Sulfatbeständigkeit auch die Erzzemente als besonders widerstandsfähig zu betrachten sind: für Tonerdezemente ist diese Widerstandsfähigkeit nur bei Magnesiumsulfat, nicht aber bei Alkalisulfat vorhanden.

Die zusammengesetzten oder gemischten Zemente enthalten alle Puzzolanen, die kalkbindend wirken sollen und in die Erhärtung eingreifen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen den kalkarmen Puzzolanen, wie Traß, Moler, Backsteinmehl, und den kalkreichen, wie Hochofenschlacke. Die ersten verniögen selbstständig überhaupt nicht zu erhärten, die letzteren dagegen können schon bei Zusatz einer geringen Menge eines Anregers, wie Kalk oder Gips, oder gar allein fest werden. Die Puzzolane werden meist einer Hitzebehandlung vor der Verwendung unterzogen (Gaize) oder haben eine derartige Hitzewirkung bei der Entstehung durchgemacht (Santorinerde, Hochofenschlacke, Traß). Der Träger der Erhärtung ist in weitaus den meisten Fällen der Portlandzement. Bei den Hochofenschlacken, die mit Gips angeregt werden (Cilorzement), ist Portlandzement aber überhaupt nicht zugegen, Träger der Erhärt-

tung ist demgemäß allein die Hochofenschlacke. Es kommen hier also nur basische tonerdeiche Schlacken in Frage.

Entsprechend dieser Zusammensetzung entwickeln alle zusammengesetzten Zemente verhältnismäßig weniger Abbindewärme als Portlandzement. Die Festigkeit der meisten Mischzemente wird durch die Zumischung herabgesetzt, bei energisch wirkenden Puzzolanen, wie Santorinerde, Gaize oder Hochofenschlacke, nur dann, wenn hohe Zusätze genommen werden. Die Wasserdichtigkeit wird durch Puzzolanezusatz erhöht, wenn die Puzzolane einen besonders langen Mörtel gibt, wie z. B. beim Traß, aber nur unter der Voraussetzung, daß der Traß nicht in zu großen Mengen angewendet und als Zuschlag gerechnet wird. Die Kohlensäurebeständigkeit steigt gleichfalls in allen Fällen durch den Zusatz geeigneter Puzzolane, da die erhärtenden Zemente dann geringe Mengen an freiem Kalk, der kohlensäurelöslich ist, aufweisen. Wenn reaktionsträge Puzzolane verwendet werden, müssen diese in den Zuschlag gerechnet werden, wenn sie günstig wirken sollen, sie dürfen also nicht als Zementersatz genommen werden. Das gleiche gilt i. allg. bei Sulfateinwirkung.

Wenn auch die Dichtigkeit des Betons bei diesen aggressiven Einflüssen von sehr großer Bedeutung ist, ist sie doch nicht allein ausschlaggebend, da im Laufe der Zeit auch sehr dichte Betone zerstört werden können. Die Erhöhung der Salzwasserbeständigkeit durch geeignete Zemente und Zusätze ist also durchaus im Bereich der Möglichkeit.

[A. 1.]

VERSAMMLUNGSBERICHTE

I. Tagung der Sektion Deutschland des Internationalen Vereins der Chemiker-Coloristen.

Leipzig, 21.—23. November 1935.

Vorsitzender: Dr.-Ing. A. Prior.

„Wolle allein und in Verbindung mit Zellwolle in Wirtschaft, Wissenschaft und Technik.“

Dr. W. Genzmer, Berlin: „Die Wolle in der Weltwirtschaft.“

Mit ihrer durch Klima, Zuchtrichtung, Ernährung der Schafe usw. bedingten Individualität steht die Wolle als Welthandelsartikel einzig da; der Qualitätsgedanke ist für die Wollindustrie von ausschlaggebender Bedeutung. Vortr. gibt an Hand von Tabellen einen Überblick über die Entwicklung der Wollausfuhr der überseeischen Produktionsländer und ihre Verteilung auf die verschiedenen europäischen Bezugsländer unter besonderer Berücksichtigung der Frage der Finanzierung der deutschen Wolleneinfuhr und geht schließlich auf die Stellung der Wolle im Wettbewerb mit anderen Spinnstoffen, wie Leinen, Baumwolle, Kunstseide, Zellwolle ein.

Dr. E. Doehner, Berlin: „Die Bedeutung der deutschen Wollerzeugung für die heimische Textilwirtschaft.“

Notwendigkeit und Umfang der in die Wege geleiteten Steigerung der deutschen Wollerzeugung werden besprochen. Nach einem Überblick über die in Deutschland vertretenen Schafrassen berichtet Vortr. über die von der Reichswollverwertung vorgenommene Trennung der deutschen Wollerzeugung nach angefallenen Qualitäten, sowie über die Möglichkeit, durch züchterische Maßnahmen die Einheitlichkeit der deutschen Wolle zu verbessern.

Direktor Ing. F. Lincke, Maffersdorf: „Sinn und Zweck der Betriebsforschung.“

Das Streben nach Steigerung der Produktion und Erhöhung der Wirtschaftlichkeit setzt die Kenntnis der Eigenschaften des Rohmaterials und die Erforschung der einzelnen Fabrikationsstufen voraus. Anknüpfend an die ersten, vom Kaiser-Wilhelm-Institut für Faserstoffchemie und vom Textilforschungsinstitut Dresden durchgeföhrten Arbeiten bespricht Vortr. eine Reihe systematischer Untersuchungen über Spinschmalz, Streichgarn- und Kammgarnwäscherei, Küpfärberei u. a. und schließt mit einer Gliederung des Aufgabenkreises eines Textilbetriebes.